



Système d'aide à la décision pour la limitation des risques d'inondation dans les agglomérations urbaines méditerranéennes

Maryse Guigo, Christine Voiron, Didier Graillot, Florence Olivier

► To cite this version:

Maryse Guigo, Christine Voiron, Didier Graillot, Florence Olivier. Système d'aide à la décision pour la limitation des risques d'inondation dans les agglomérations urbaines méditerranéennes. 2002. hal-00410038

HAL Id: hal-00410038

<https://hal.science/hal-00410038>

Preprint submitted on 16 Aug 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Projet n°8 : Programme RIO

**UMR 6012 ESPACE – Université de Nice –
Sophia Antipolis**

**Système d'aide à la décision
pour la limitation des risques d'inondation
dans les agglomérations urbaines
méditerranéennes**



Maryse Guigo
Christine Voiron, Florence Olivier
Didier Graillot



Projet n° 8

Système d'aide à la décision pour la limitation des risques d'inondation dans les agglomérations urbaines méditerranéennes

*Maryse Guigo,
Christine Voiron-Canicio, Florence Olivier
Didier Graillot*

**UMR 6012 ESPACE (Université de Nice - Sophia Antipolis),
IGA-UJF (Grenoble),
EMSE (Saint-Etienne)**

1. Objectifs, concepts et méthodologie

Maryse Guigo

1.1. Les objectifs

1.1.1. Les objectifs de l'étude

Pour répondre aux attendus de notre contrat, notre objectif est de proposer un outil de gestion de l'espace destiné aux décideurs. Il permettra de détecter les zones urbaines et péri-urbaines soumises au risque d'inondation, et d'agir en conséquence sur de possibles politiques urbaines dans les domaines de la construction, de la gestion des flux de circulation et des types d'organisation de la morphologie urbaine. Pour cela nous modélisons la spatialisation et la dynamique du risque ; les modèles implémentés dans des environnements informatiques permettront des simulations qui constituent dans une perspective prospective, une aide précieuse à la prise de décision

Nous envisageons de travailler à diverses échelles spatiales emboîtées (Fig. 1.1), correspondant à différents types de gestion de l'espace :

la première prend en compte l'espace communal, comme à Nîmes, ou un espace naturel homogène où s'applique une gestion socio-économique diversifiée comme la plaine du Var (Nice) ;

la seconde est celle de la gestion du risque en fonction des flux de population à l'intérieur du tissu urbain au niveau d'un secteur traversé par un fleuve (le Paillon à Nice) ;

la troisième s'attache à traduire l'impact du risque au niveau de l'organisation technique du bâti.

Le travail à ces différentes échelles nécessite la mise en place de méthodologies spécifiques qui seront exposées dans les chapitres suivants qui donneront lieu à la mise au point, soit de simples modèles symboliques soit des modèles implémentés dans un environnement de résolution de problèmes permettant des simulations dont les résultats constitueront des documents cartographiques.

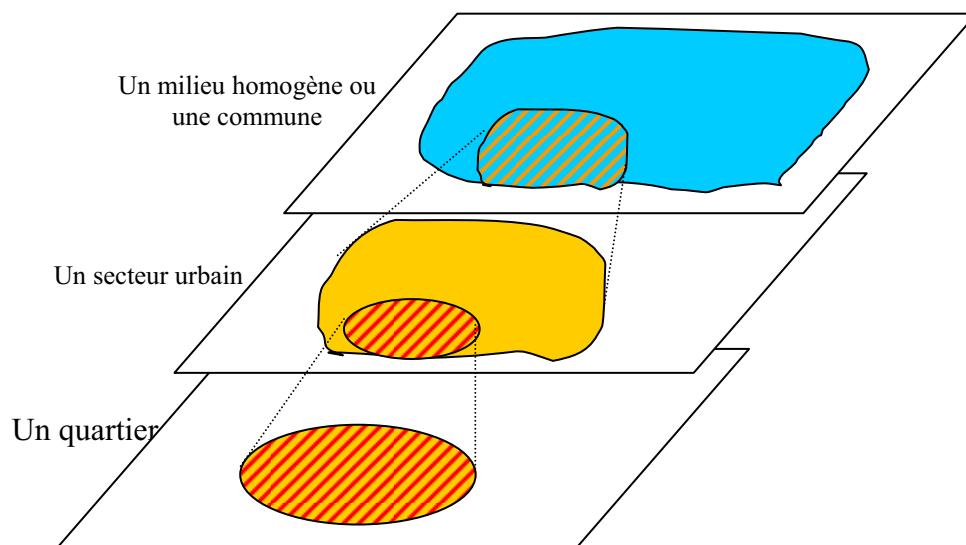


Figure 1.1. : Echelles spatiales emboîtées

1.1.2. Les objectifs de gestion de l'espace face au risque d'inondation

La gestion de l'espace dans les zones soumises à des risques d'inondation a pour but d'intégrer la gestion du risque dans l'aménagement du territoire.

Il est donc nécessaire de déterminer avec précision la dynamique du risque en fonction de la dynamique urbaine. En effet le risque n'est pas une donnée liée seulement à l'aléa, mais il se définit en fonction des biens et des personnes concernés. Certains espaces, peu occupés, peuvent subir des inondations sans que cela représente un risque majeur. En revanche, s'ils s'urbanisent, le même aléa engendrera sur le même espace un risque fort. Le risque varie donc fortement en fonction du type d'occupation du sol.

La dynamique de l'occupation du sol est fonction de la conjoncture économique et corrélativement de la pression foncière, dans les périodes de croissance. Elle est gérée au travers des documents juridiques tels que le SDAU ou le POS. L'établissement de ces documents prenait en compte les stratégies des politiques et ces critères économiques. Dorénavant, compte tenu des événements catastrophiques qui se sont produits dans les secteurs urbanisés et la mise en place corrélatrice d'une abondante législation nationale et européenne, la gestion de l'espace devra tenir compte du risque.

De ce fait, la révision des documents d'urbanisme ne pourra plus découler seulement d'une prise de décision politico-économique. Notre travail vise à proposer un outil d'aide à la décision aux élus et aux administrateurs chargés de gérer les espaces concernés.

Les objectifs ainsi définis, notre travail repose sur la prise en compte d'un certain nombre de concepts généraux concernant les inondations et leurs impacts dont la définition a été précisée notamment par le CEMAGREF et le Ministère de l'Environnement. Nous en reprendrons la teneur en la précisant en fonction de nos propres objectifs.

1.2. La définition des concepts

L'aléa étant un des paramètres définissant le risque, il nous apparaît fondamental de l'apprécier en premier lieu. Il constitue un facteur initial de l'appréciation du risque. Dans un deuxième temps, nous nous attacherons à définir la vulnérabilité. Cette réflexion s'appuie sur les travaux du CEMAGREF¹ qui ont abouti à caractériser le risque comme étant le croisement d'un aléa et d'une vulnérabilité.

1.2.1. L'aléa

Le premier concept de cette définition est l'aléa. Celui-ci se définit comme étant la probabilité d'un phénomène naturel à se manifester et pouvant créer des dégâts humains et matériels. Il tient compte de l'intensité et de la fréquence du phénomène, bien que ce phénomène physique soit difficile à mesurer.

¹ Oberlin G., Gautier J.N., Chastan B., Farissier P., Givone P. : Une méthode globale pour la gestion rationnelle des zones inondables : le programme " inondabilité " du CEMAGREF, Sécheresse n°4, 171-6, 1993.

L'aléa climatique varie peu à l'échelle humaine. Cependant, en cas d'inondation par ruissellement pluvial, certains facteurs aggravants le font varier. C'est le cas dans la plaine du Var à Nice et de la commune de Nîmes.

- Le premier de ces facteurs aggravants est la topographie. Par exemple à Nîmes où de petits bassins versants, les "cadereaux" au profil longitudinal, en pente forte à l'amont, rejoignent la plaine du Vistre après une forte rupture de pente ; cette dernière génère une concentration des eaux d'écoulement et ralentit considérablement leur évacuation.

- Le second est la présence de vastes secteurs urbanisés que le cours d'eau traverse, y compris en souterrain. Ces paramètres anthropiques, augmentant le ruissellement par l'imperméabilisation des surfaces urbanisées, limitent les écoulements contraints dans un réseau d'évacuation des eaux d'âge divers et aux diamètres variables. De plus, les objets charriés par les flots provoquent presque toujours des embâcles aux conséquences très graves.

L'aléa hydrologique, qui n'est en fait qu'une manifestation exceptionnelle d'un phénomène naturel, est donc dû à un événement pluviométrique exacerbé par des facteurs anthropiques et naturels spécifiques.

L'ampleur catastrophique que peut prendre l'événement s'explique, une fois l'aléa défini, par l'exposition à une vulnérabilité particulière.

1.2.2. La vulnérabilité

Le deuxième concept permettant de définir le risque est la vulnérabilité. Elle se caractérise par la propension d'une société donnée à subir les dommages d'un phénomène destructeur. Elle relève d'enjeux socio-économiques et humains.

La vulnérabilité revêt deux aspects :

- l'un direct, lié à la destruction des biens et à la mort des personnes ;
- l'autre indirecte, lié à l'impact économique de la catastrophe sur les activités par arrêt de la production (destruction de bâtiments d'entreprises), aux difficultés d'accessibilité (destruction de la voirie) liée à la coupure des voies de communications (rupture des réseaux).

Le système de vulnérabilité se compose ainsi d'éléments vulnérables et de facteurs qui tendent à le faire varier (Fig. 1.2). La vulnérabilité, qui se mesure donc en terme de dommages, dépend de l'intensité de l'inondation et de la nature des biens exposés, qui eux-mêmes dépendent des modes d'occupation et d'utilisation des sols.

Cette notion de vulnérabilité est dynamique, à la fois dans le temps et dans l'espace, et peut engendrer des situations plus ou moins dangereuses pour une société exposée. En effet, à l'inverse de l'aléa, la vulnérabilité est en perpétuelle évolution et par conséquent elle fait varier fortement le risque. Chaque fois que l'on modifie l'usage ou l'occupation du sol dans une zone exposée à un aléa, on est susceptible de modifier l'intensité du risque.

Dans notre étude, nous avons distingué plusieurs types de vulnérabilité. A Nice, nous avons qualifié la vulnérabilité d'agricole pour des surfaces vouées aux activités agricoles, et d'urbano-industrielle, pour des surfaces occupées par du bâti urbain et industriel. A Nîmes, nous nous sommes intéressés à la vulnérabilité des personnes et du bâti. Ces différents types de vulnérabilité impliquent des approches spécifiques.

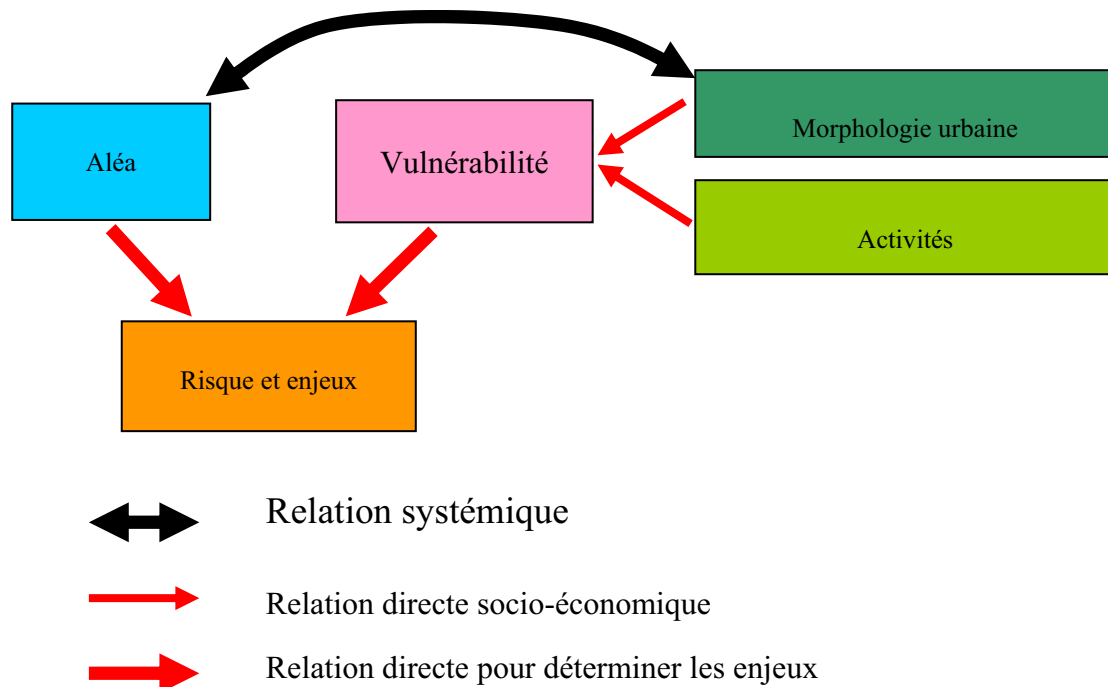


Fig. 1.2. : Les paramètres de définition du risque et des enjeux

1.2.3. Le risque

Le risque, qui est la possibilité de voir se manifester un phénomène dommageable pour la vie des hommes, leurs biens, leurs activités ou leur environnement, n'est que potentiel. Il mesure l'événement possible, il évolue selon le temps et les lieux. Il est la résultante du croisement entre un aléa et des vulnérabilités.

La relation entre la croissance urbaine et le risque d'inondation dépend d'un enjeu spatial. S'il n'y avait pas la présence d'une ville, le risque se manifesterait différemment : nous aurions toujours un événement pluvio-orageux, mais il se produirait sur un "milieu naturel", la vulnérabilité serait moins forte étant donné l'absence d'enjeux humains et socio-économiques. Par conséquent, l'inondation serait moins catastrophique et retrouverait son caractère naturel. Par ailleurs la croissance de la ville transforme sa propre morphologie.

Toute nouvelle morphologie urbaine génère de nouvelles modalités d'écoulement du flux, donc de l'aléa. La dynamique du milieu urbain et de l'aléa, donc du risque, constitue un phénomène de type systémique à effet rétroactif. Le risque est donc inhérent à la croissance urbaine, il y est intrinsèquement associé. On peut parler alors de "risque urbain", c'est-à-dire de risque engendré par le fonctionnement même de la ville. Le risque est vu ici comme une entité logique qui a sa propre cohérence dans les interactions urbaines.

S'il existe plusieurs types de vulnérabilité, il existe alors plusieurs risques. En effet, les caractéristiques climatiques et hydrologiques d'un événement connu engendrent des événements pluvieux majeurs totalement différents selon qu'ils se produisent dans des secteurs agricoles ou sur des secteurs urbains, à une période ou à une autre de la journée. Notre référentiel d'étude devient donc un espace-temps complexe qui permet d'apprécier plus finement le risque.

**2. Modèle de gestion spatiale prospective en fonction
des risques d'inondation
à l'échelle d'un milieu naturel homogène :
la plaine du Var**

Maryse Guigo

2.1. Un site et une méthodologie

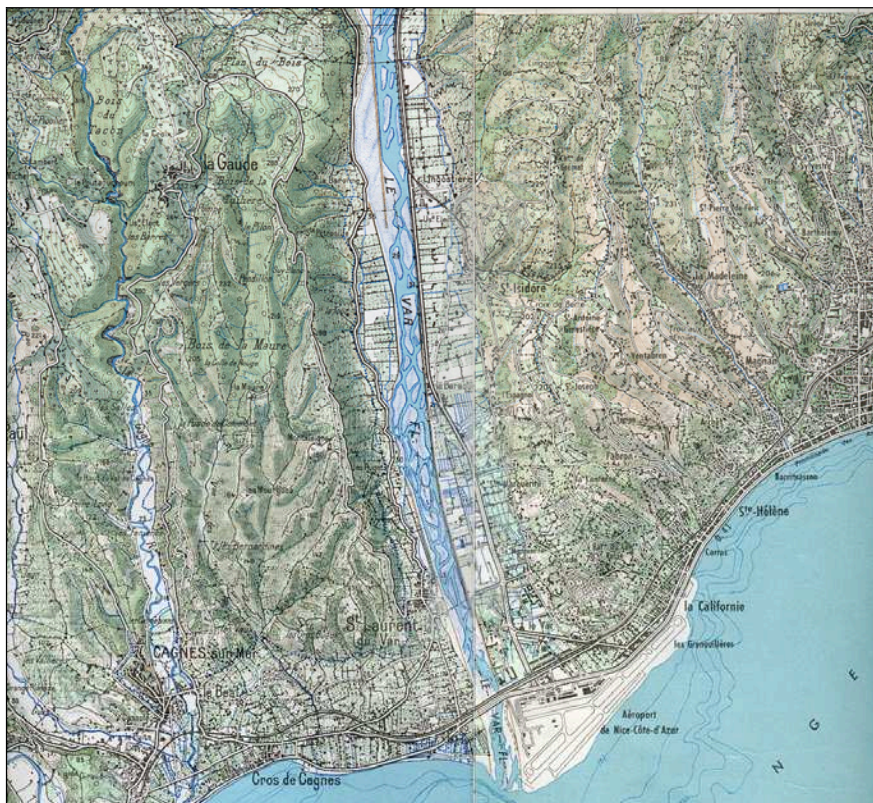
2.1.1. Une plaine méditerranéenne au sein d'une conurbation

Notre espace d'étude est celui de la basse vallée du Var situé à l'Ouest de Nice. Il se situe à l'aval des gorges de la Mescla où le fleuve traverse les derniers chaînons alpins pour s'étendre dans une plaine alluviale de topographie très plane, correspondant à la dynamique fluviale des rivières méditerranéennes à écoulement torrentiel et anastomosé. Cette plaine est encadrée par des collines en pente relativement forte. Elle se termine par un delta.

Cette zone, qui était très peu occupée au début du siècle, a fait l'objet de nombreux aménagements :

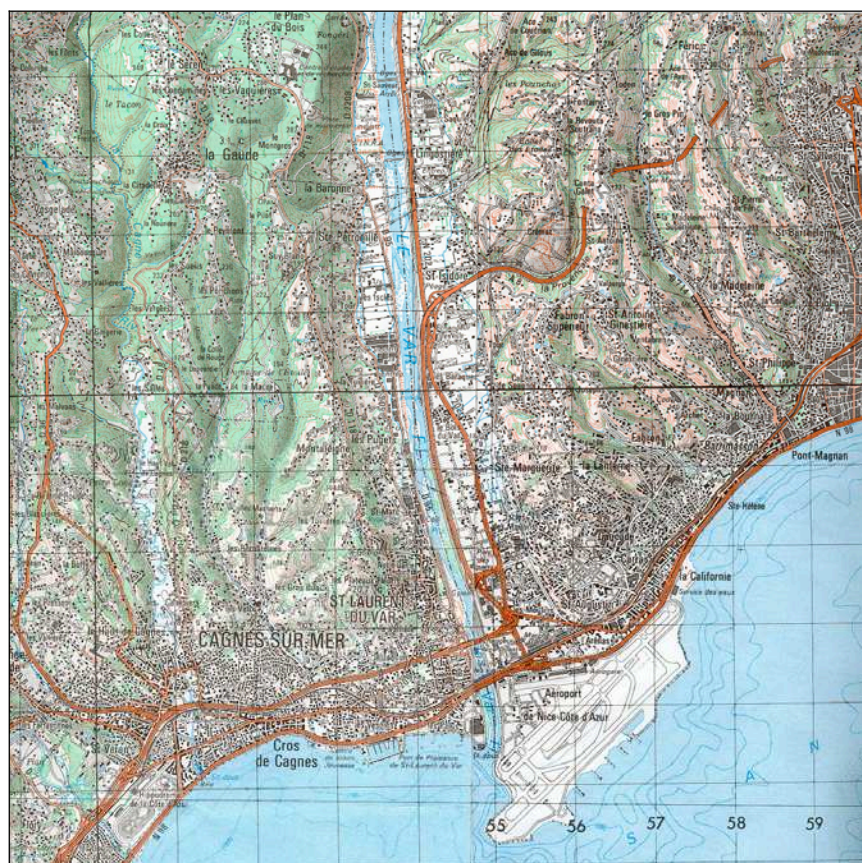
- des endiguements, pour contenir les crues et gagner des espaces aménageables ;
- des casiers colmatés, puis valorisés tout d'abord par des activités agricoles intensives ;
- puis, lentement, l'importance de la dynamique urbaine littorale a contribué à modifier ces espaces qui deviennent de plus en plus des zones bâties ;

Ce fleuve méditerranéen connaît naturellement des crues violentes constituant un aléa qui ne génère pas de risque majeur, tant que le lit du fleuve est inoccupé et donc que la vulnérabilité et les enjeux sont faibles. Mais l'occupation du fond de la vallée est de plus en plus intense, comme on peut le voir si l'on compare les cartes que nous présentons ici (Fig. 2.1 et 2.2).



Source : carte I.G.N. au 1/50000

Fig. 2.1. : La basse vallée du Var en 1958



Source : carte I.G.N. au 1/50000

Fig. 2.2. : La basse vallée du Var en 1987

En trente ans, le bâti a envahi le lit majeur, abrité derrière les digues. Mais le courant très fort, lors des crues, donne aux eaux une puissance dévastatrice au moindre débordement.

Cette situation, où la dynamique économique, l'urbanisation intense due à l'attrait de cette zone littorale et un trafic en constante expansion, fait de ce secteur une zone de pression foncière majeure pour le seul espace plan et non entièrement construit. Cette vallée constitue donc un véritable enjeu pour les décideurs qui doivent, avant d'autoriser de nouvelles installations, mesurer les impacts de la croissance du risque au travers de la création de nouvelles vulnérabilités.

2.1.2. Des choix raisonnés

2.1.2.1. Choix de l'étude diachronique

De nombreux travaux antérieurs nous ont amené à retenir une étude diachronique de l'occupation du sol. En effet, la définition même de la vulnérabilité et du risque varie dans le temps en fonction des enjeux socio-économiques. La croissance urbaine de la vallée du Var est récente et s'est toujours effectuée parallèlement à l'expansion du pôle niçois. Si l'on observe la croissance démographique de celui-ci, cinq phases apparaissent :

- jusqu'au début du siècle, la croissance était linéaire ;
- puis, elle s'est fortement accélérée pendant l'entre-deux-guerres ; c'est à ce moment que la plaine du Var est entièrement endiguée et que les casiers créés accueillent une agriculture maraîchère destinée à l'approvisionnement d'une grande partie de la zone urbanisée. Cette activité est alors prépondérante dans la vallée et elle le restera jusqu'aux années 70 ;
- la reprise après la seconde guerre mondiale fut lente. Ce sont les flux migratoires, et notamment les 25 000 rapatriés pieds-noirs, qui furent responsables du second boom démographique, dès 1962 ;
- à partir de 1975, la croissance démographique est freinée au niveau de la ville même ;
- mais, dès 1986 la reprise économique est amorcée. Cette reprise économique est due au développement du tourisme de masse et corrélativement à l'industrie du bâtiment ainsi qu'au développement des hautes technologies. En effet, ces dix dernières années, on a assisté à une diversification des activités économiques grâce au développement des activités chimiques et électroniques. Jusque là, l'industrialisation des communes de la vallée du Var était due au transfert des industries des villes de Nice et Saint Laurent du Var. Dorénavant, des entreprises de toute la France et même de toute l'Europe les ont rejointes. On a aussi assisté à l'émergence des activités de services ; ainsi de grandes surfaces sont apparues en périphérie des villes. De plus, Nice a su attirer les services dits quaternaires favorables au développement des entreprises.

En conclusion, on peut considérer qu'il existe trois phases dans l'évolution de cette région urbaine :

- la première phase est celle du premier développement touristique avec l'endiguement du fleuve et le développement agricole qui se poursuit après la seconde guerre mondiale ; nous avons choisi comme année représentative de cette période l'année 1955.
- la seconde, corrélatrice aux flux migratoires et au développement du tourisme de masse, voit le "grignotage" de l'espace agricole par les activités industrielles et de service ; pour caractériser cette étape nous avons choisi l'année 1977.
- la dernière phase correspond à la dynamique actuelle où la pression urbaine se fait de plus en plus forte, et trouve dans la vallée du Var un des rares espaces plans non encore construits ; pour étudier ce phénomène nous avons retenu l'année 1994.

Nous avons donc réalisé une étude diachronique mettant en évidence la dynamique de l'occupation du sol, et plus précisément le passage d'un espace à dominante agricole qui se transforme en espace de plus en plus urbanisé sous l'effet de la pression foncière. Cette dynamique constitue un exemple d'école pour l'étude de la variation de la vulnérabilité et des enjeux dans une zone soumise à un risque naturel majeur.

2.1.2.2. De la connaissance de l'aléa

L'aléa qui est défini par la hauteur de l'eau et sa vitesse dans les zones inondées dépend donc directement du débit. Ce dernier est mesuré depuis longtemps sur le bassin versant du Var et de ses affluents. Les mesures ainsi réalisées, notamment par EDF depuis le début du siècle, ont permis de définir la valeur des débits caractéristiques.

L'événement du 5 novembre 1994 a montré que le débit pouvait être bien supérieur à ce qui était prévu à partir des connaissances précédentes. L'étude entreprise par la SOGREAH a chiffré ce dernier à 3512 m³/s à Nice, alors que la crue centennale avait été estimée auparavant à 1800 m³/s. Les nouveaux débits caractéristiques sont reportés dans le tableau suivant :

	Débit décennal en m ³ /s	Débit centennal en m ³ /s
Var à la Mescla	1472	2529
Var au Plan du Var	1717	2949
Var à Nice	2045	3512

Source, les débits caractéristiques calculés par la SOGREAH

Cette crue permet de reconsidérer l'aléa. En effet, nous ne possédions aucune donnée hydrologique sur un événement d'une telle ampleur, par conséquent, les valeurs attribuées à l'aléa ont dû être revues. Cette crue n'a en rien modifié l'aléa réel qui est un élément fixe du risque, dorénavant, il est simplement mieux connu.

L'aléa peut être considéré comme une constante dans l'étude du risque, face à la variation de la vulnérabilité, si l'on considère l'échelle temporelle de la dynamique de l'occupation de l'espace, notamment dans des secteurs de très fort développement urbain comme celui que nous étudions. Cependant, il est clair que sa connaissance dans des milieux comme les milieux méditerranéens, où les événements pluvieux et hydrologiques ont une extrême variabilité, doit toujours être considérée comme provisoire. On peut d'ailleurs observer que cette particularité apparaît lorsque l'on ajuste, comme habituellement, les précipitations journalières extrêmes à une loi Gumbel. Dans ce cas, comme on peut le voir sur le graphique de la figure 2.3, le segment de droite qui ajuste les valeurs extrêmes "fortes" n'est pas dans la continuité de celui qui ajuste les valeurs extrêmes "faibles" ou "moyennes".



Le Var dans les gorges de la Mescla : 5 novembre 1994



Seuil et microcentrale à Plan du Var: 5 novembre 1994

Station de Contes (Alpes-Maritimes)
 pluies journalières maximales (période 1966 – 1985)

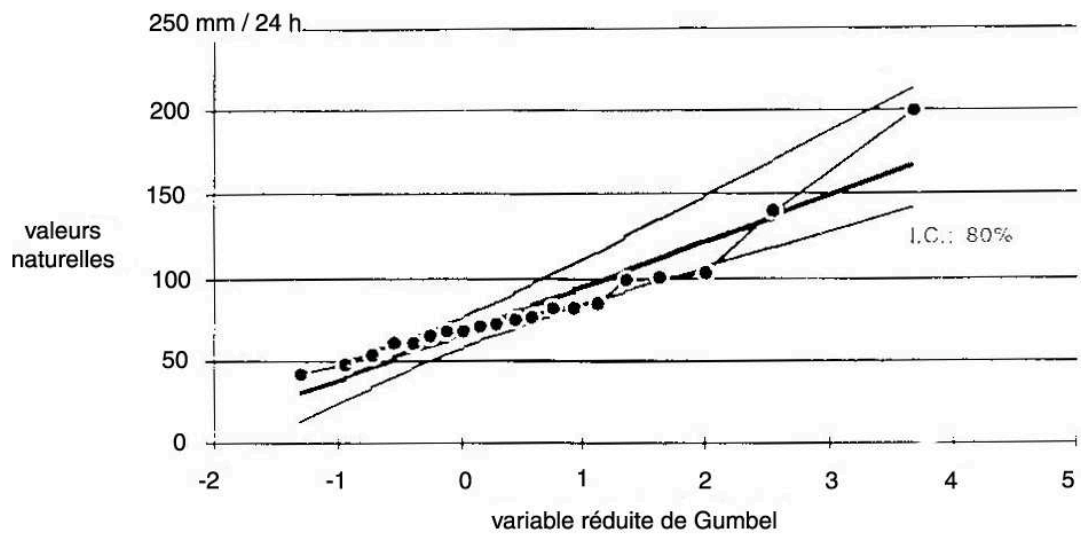


Fig. 2.3 : ajustement des pluies par une loi de Gumbel,

Il est donc évident que les pluies caractéristiques les plus violentes sont difficiles à apprécier, ce qui rend corrélativement tout aussi difficile l'estimation des débits extrêmes caractéristiques.

La révision de la valeur du débit centennal pour le Var en est une démonstration. Il faudra donc tenir compte de cet état de fait dans la validité de l'estimation de l'aléa et du risque.

2.1.2.3. Les impacts des aménagements sur l'aléa

L'aléa pluviométrique et l'écoulement, qui peuvent être considérés comme constants et de mieux en mieux connus, génèrent un aléa hydrologique qui varie considérablement en fonction des aménagements qui ont été effectués dans le lit. Certains aménagements ont considérablement réduit le lit majeur, au fil des années, c'est le cas :

- des endiguements tout au long de la basse vallée (Fig. 2.4);
- du doublement de la RN 202, qui a diminué d'un tiers la largeur du lit dans les gorges de la Mescla ;
- de la construction du Centre Administratif au niveau duquel la distance entre les digues n'est plus que de 100 m (Fig. 2.5).

L'aléa hydrologique s'en est trouvé modifié par diminution du chenal d'écoulement des crues. La hauteur et la vitesse du flux ont été corrélativement accrues. L'exploitation des matériaux fluviaux a dans un premier temps creusé le lit, ce qui a contribué à déchausser les digues et à les fragiliser. Après l'installation des seuils, le remplissage par les argiles déposées à l'arrière des ouvrages a au contraire exhaussé le lit et favorisé les débordements. Mais, par ailleurs, la charge en matériaux augmente la compétence du fleuve en période de pointe de crue et favorise l'érosion, donc la déstabilisation des ouvrages.

Cette dynamique montre que l'aléa est influencé par les aménagements. Les partis pris dans la gestion de l'espace génèrent aussi bien de nouvelles vulnérabilités que des variations de l'aléa, à l'origine d'un risque accru, dans une sorte de boucle de rétroaction, souvent difficile à percevoir si elle n'a pas été comprise et éventuellement simulée au préalable.

2.1.3. Méthodologie et implémentations

2.1.3.1. Méthodologie pour l'étude des espaces naturels homogènes et des espaces communaux

Pour mener à bien les objectifs fixés, nous avons mis en œuvre une méthodologie précise qui repose sur plusieurs idées :

- répondre à un objectif de représentation de l'information et de travail de recherche en partant des éléments simples pour aller vers des interprétations croisées, puis des requêtes ou calculs plus complexes. On abordera ensuite les éléments relationnels entre les différents paramètres, de manière à traiter le problème du risque. Cela en relation avec la gestion de l'espace communal, au travers de la révision du POS et des impacts des aménagements prévus ;
- représenter de manière cartographique les phénomènes étudiés. La représentation spatiale des données sous forme d'un figuré en teinte à plat permet une lecture immédiate des phénomènes, même si ces derniers sont complexes. Ce mode de cartographie permet au spécialiste d'avoir une vision globale et comparative des faits, et aux non-spécialistes de faire une lecture facile à partir d'une légende simple et d'un figuré directement compréhensible ;

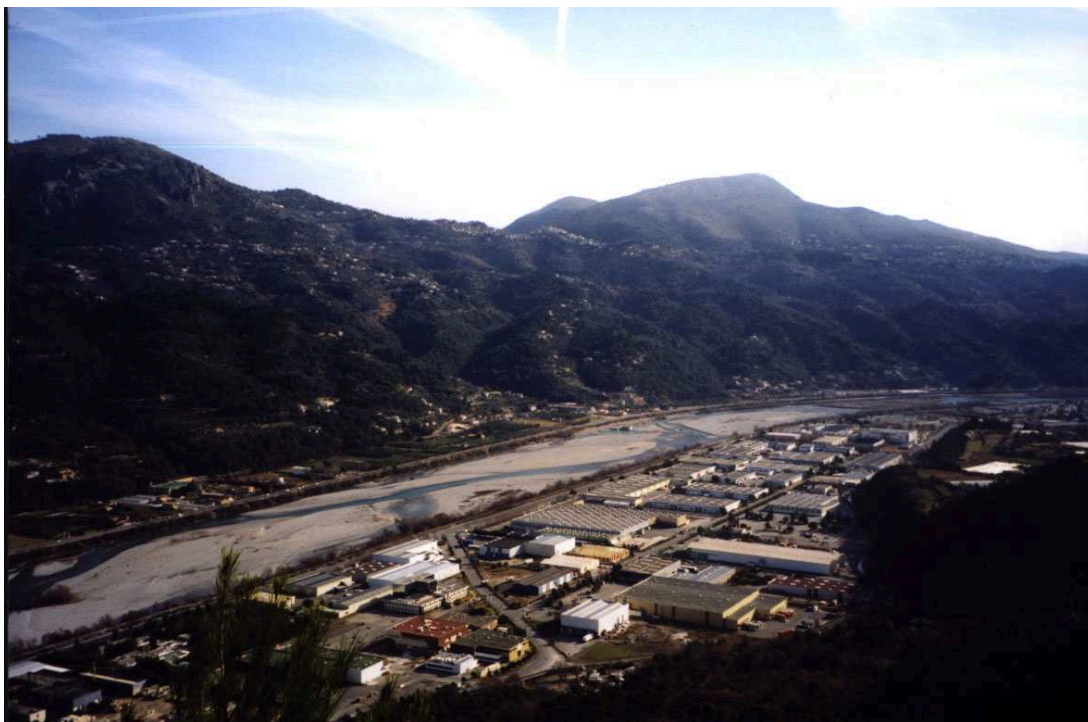


Fig. 2.4 : Les endiguements le long de la vallée du Var



Fig. 2.5 : La largeur du lit à l'aval

La mise au point d'une méthodologie totalement explicitée permet d'appliquer le même processus de travail à des phases successives d'aménagement de l'espace urbain. Une fois la méthodologie mise au point, une constante mise à jour peut s'envisager.

L'ensemble de ce savoir permet de réaliser, dans la seconde année de cette recherche, pour la commune de Nîmes, une expertise formalisée dans une base de connaissances qui prend en compte la connaissance spatiale. Ce modèle, une fois implémenté et informé à partir des plans d'information, permettra d'effectuer des simulations de scénarios de gestion de l'espace, permettant aux décideurs de voir quels sont les secteurs où le risque s'accroît en fonction des politiques d'aménagement ou des décisions telles que les révisions de POS.

Pour mener à bien cet objectif il est nécessaire de rechercher une importante quantité d'informations et de choisir un environnement de résolution de problèmes.

2.1.3.2. La recherche de la connaissance

L'acquisition de la connaissance s'est faite à partir d'un ensemble de documents et de dossiers.

L'occupation du sol

Nous avons décidé d'établir notre choix diachronique en fonction de trois missions aériennes qui correspondent à des périodes de transition socio-économique. Nous avons retenu les photos de 1955, 1977, 1994. Les cartes topographiques IGN correspondantes sont celles de 1933, 1958, 1966, 1987, 1994. C'est à partir de ces documents que nous avons établi les cartes d'occupation du sol.

L'aléa

L'information concernant l'aléa a été établie par la SOGREAH à partir de l'événement du 5 novembre 1994. La cartographie de l'aléa, pour ces événements qui peuvent être considérés comme majeurs, tient compte de l'étendue de l'inondation, de sa hauteur et de la vitesse du courant.

2.1.3.3 Outil informatique et formalisation de la connaissance

Formalisation de la connaissance au sein de la structure informatique

La connaissance est introduite dans notre modèle informatique comme présenté sur la figure 2.6 :

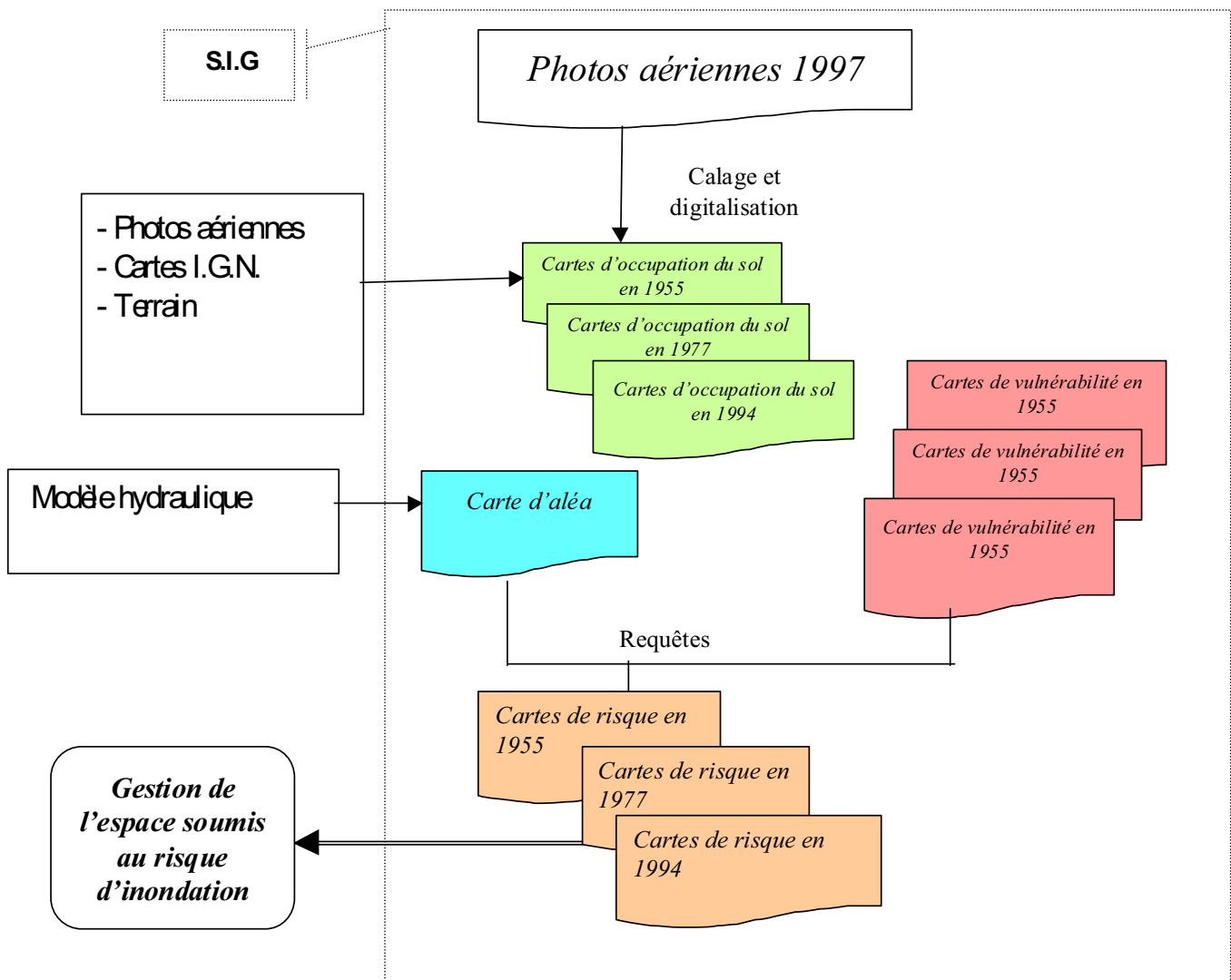


Fig . 2.6. Formalisation de la connaissance

- le fond parcellaire correspond à celui des photographies aériennes de 1994 ; il a été scanné et numérisé ;
- l'occupation du sol est reportée pour les années retenues sur ce fond parcellaire ;
- l'aléa a été représenté dans le même référentiel ;

Les requêtes du SIG ont permis de créer une information en réalisant les cartes de vulnérabilité et de risque.

Choix d'une structure informatique

Le choix s'est porté pour plusieurs raisons sur un SIG (Système d'Information Géographique), il permet :

- le traitement d'un nombre très important d'objets qui sont ici les parcelles d'occupation du sol ;
- de représenter des données géographiques attachées à des objets surfaciques géoréférencés, et donc de situer les phénomènes sur un site précis ;
- de remettre à jour sans problème une cartographie liée informatiquement à une base de données géographiques ;
- et par ses fonctions, de faire des requêtes pour les superpositions, les exclusions ou les associations d'information, aussi bien que des calculs plus complexes.

2.2.1. Les cartes d'occupation du sol : évolution de l'occupation du sol de 1955 à nos jours

2.2.1.1. Typologie de l'occupation du sol

Il nous faut tout d'abord dresser une typologie des différents types d'occupation du sol. Elle doit faire apparaître les zones d'habitation, les zones d'activités mais aussi les zones en friche. Cette classification tient compte du type de bâti, de sa densité et de ses fonctions ; ces critères mettent en valeur les enjeux socio-économiques et par conséquent la vulnérabilité.

Nous avons défini les classes suivantes :

- des zones d'habitation, où :
 - l'habitat collectif, caractérisé par de grands ensembles avec des bâtiments en hauteur, peu vulnérables où cependant la densité de population est très forte ;
 - l'habitat individuel, aggloméré dans des lotissements ou diffus, où la densité est moins forte que dans le cas précédent, mais où l'ensemble des biens se situe au niveau du sol ;
 - l'habitat mixte, qui correspond à une classe intermédiaire, où se côtoient les habitats collectif et individuel.
- des zones d'activités constituant les classes suivantes :
 - les industries et les entrepôts généralement rassemblés dans des zones industrielles ;
 - les commerces et l'artisanat ainsi que les administrations, zones du tertiaire à forte fréquentation et parfois forte valeur des biens d'équipement (informatique, réseaux) ;
 - l'agriculture, divisée en deux zones : l'agriculture "à ciel ouvert " et l'agriculture sous serre, quelle que soit leur spécialité, les cultures étant en majorité maraîchères. Nous avons divisé l'agriculture en deux catégories car les dégâts occasionnés sur les serres sont beaucoup plus coûteux ;
 - les infrastructures de loisir : parcs, gymnases, terrains de football, jeux de tennis vulnérables surtout pendant les périodes d'intense fréquentation ;
 - les infrastructures de transport très vulnérables, ici l'aéroport qui draine l'un des flux le plus important de France.
- des zones de friches : elles correspondent à des terrains vacants, caractéristiques de la transition d'une occupation agricole vers une occupation le plus souvent tertiaire, secondaire ou résidentielle.

2.2.2.2. L'occupation du sol en 1955

Cette période correspond à la faible croissance démographique de l'après deuxième guerre mondiale. Les infrastructures étaient peu développées et l'économie essentiellement agricole. Cette carte (Fig. 2.7) constitue le point de départ de l'étude de l'évolution de l'occupation du sol.

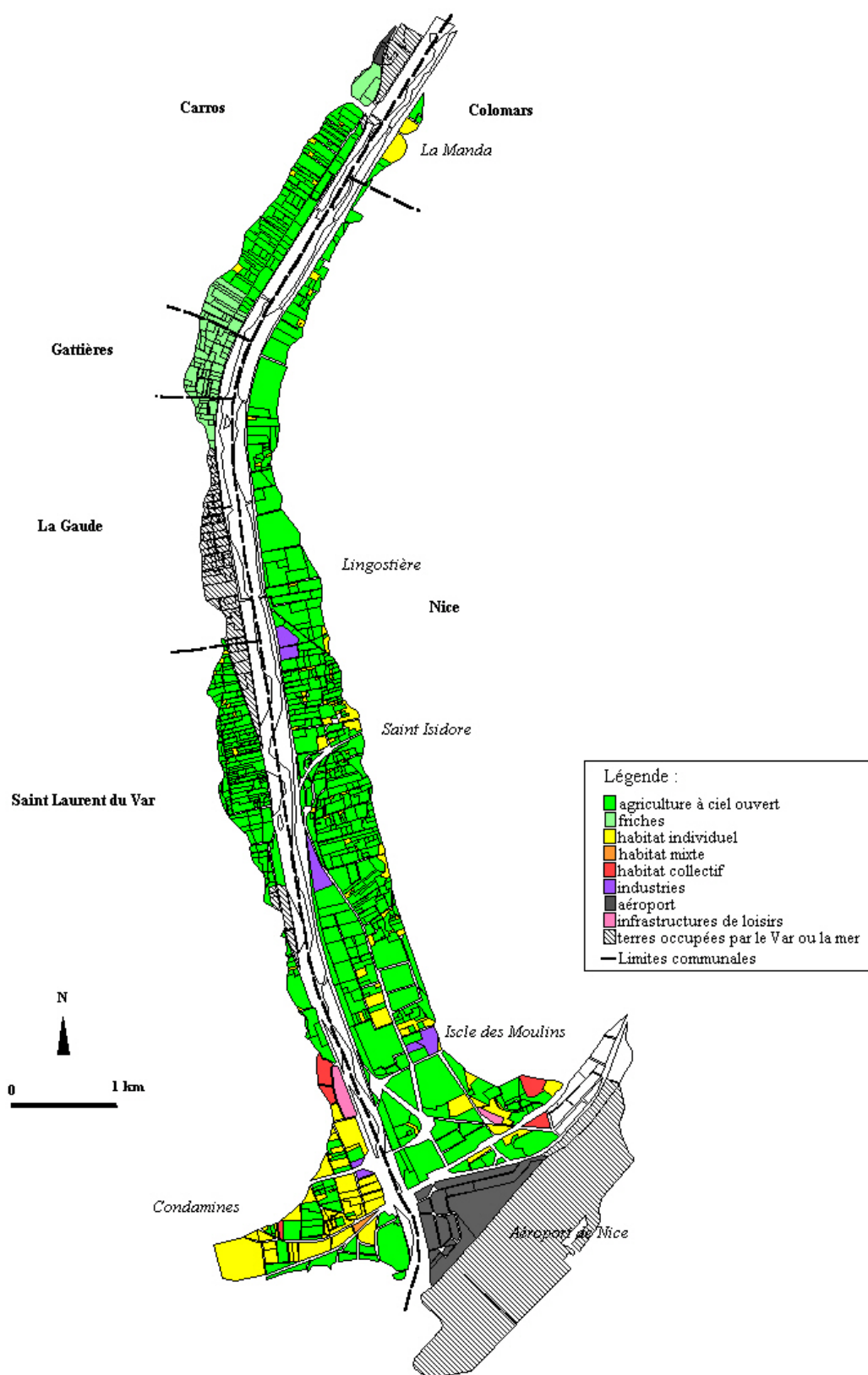


Fig. 2.7 : La carte de l'occupation du sol en 1955

On remarque que l'habitat est très peu dense et surtout individuel (13 % des surfaces occupées). En effet, la ville de Saint Laurent du Var n'est pas très importante et celle de Nice ne s'étend pas encore jusqu'au Var. Les parties de ces communes situées en zone inondable ne sont occupées que par un habitat individuel modérément dense, lié à l'agriculture. Dans le reste de la vallée, l'habitat est très diffus, excepté au niveau de Saint Isidore (Nice), dont le centre est ancien, et de la Manda (Colomars).

L'économie était largement dominée par les activités du bâtiment, à l'image des entreprises de Lingostière et du sud de Saint Isidore. Les autres industries étaient artisanales et encore concentrées dans les zones urbaines, près des Condamines pour Saint Laurent du Var et au sud des Iscles des Moulins pour Nice. Quant au secteur tertiaire, hormis le tourisme, il n'était pas du tout développé.

L'agriculture est l'activité dominante de cette économie peu diversifiée, elle occupe 72 % des terrains de la vallée, y compris dans les communes plus urbaines de Nice et Saint Laurent du Var.

Les grosses infrastructures de transport (autoroute, aéroport) ne sont pas encore réalisées.

Le cours du Var est endigué, mais les casiers situés au-delà des digues sont soit voués à l'agriculture, soit en friches, pouvant constituer autant de zones d'écêtement de la crue.

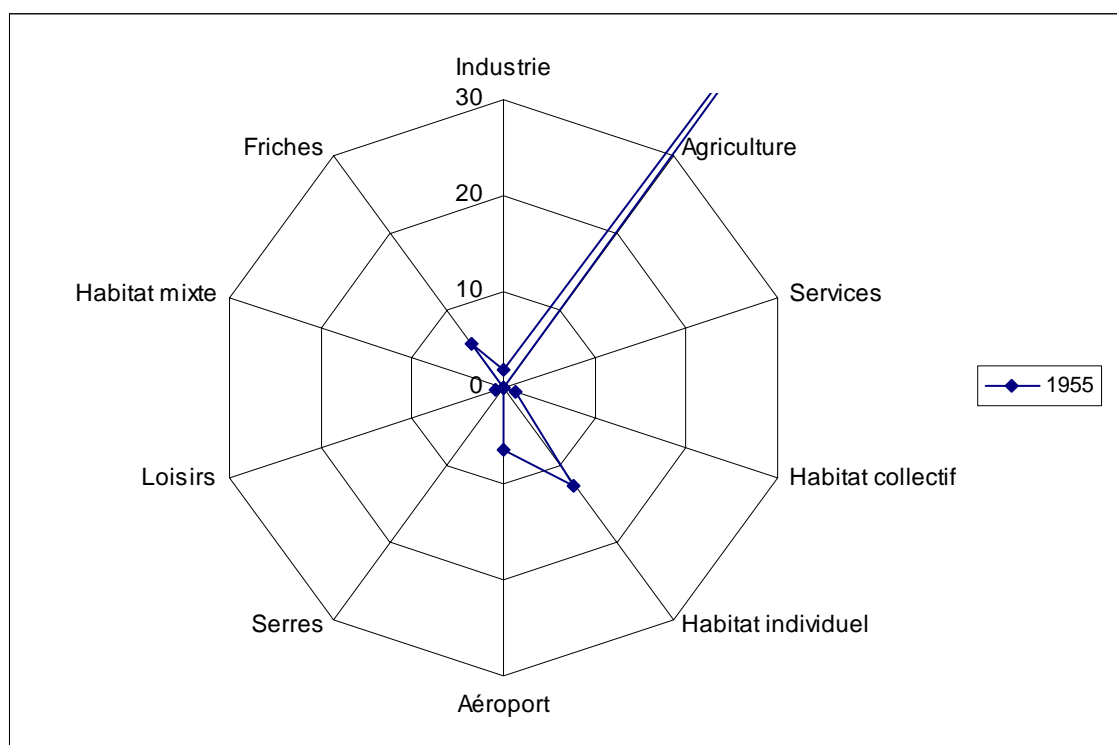


Fig. 2.8 : Pourcentage des différents types d'occupation du sol en 1955

2.2.2.3. L'occupation du sol en 1977

La carte montre l'extension de l'urbanisation due à l'arrivée des rapatriés d'Algérie depuis la fin des années cinquante. Parallèlement, la localisation des activités a été transférée, des villes, où le bâti devenait de plus en plus dense, vers les communes voisines.

On remarque donc une très forte densification de l'habitat dans les communes de Nice, ainsi qu'une densification de Saint Laurent du Var. Cette extension est caractérisée entre autres par l'apparition de grands ensembles, qui sont passés de 1 % des surfaces en 1955 à 7 % en 1977. On observe à Nice la construction de tout le quartier Saint Augustin et à Saint Laurent du Var la densification des quartiers du Nord-Est de la ville. Cette densification se note aussi dans les communes voisines : La Gaude, Gattières et Carros.

Par manque d'espace dans les zones urbanisées, les activités ont été transférées plus en amont dans la vallée. De nouveaux endiguements latéraux ont permis un gain en surfaces constructibles, ces espaces ont été transformés en zones industrielles, à l'image de celles de Carros et Saint Laurent du Var. De plus, on assiste à une légère diversification de l'économie avec le développement du tertiaire, qui occupe 7 % de la plaine :

- un premier centre commercial s'est construit à Saint Laurent du Var (Cap 3000),
- un second est en construction à Lingostière, au nord de Nice,
- la préfecture est en train de s'implanter au cœur de la cité administrative,
- à proximité s'est installé le marché international.

D'autres activités de services s'implantent ponctuellement plus en amont : les locaux de Nice Matin près des Iscles des Moulins, la Sonacotra à l'ouest des Iscles du cap Spagnol.

En conséquence, les espaces cultivés se réduisent, mais l'agriculture s'intensifie et l'on voit apparaître de nombreuses serres. De plus, les loisirs se sont considérablement développés.

Le contexte démographique et économique a entraîné le développement des infrastructures. Les axes routiers se font plus larges, l'autoroute A8 a été construite, l'aéroport est en pleine croissance.

Les friches sont plus nombreuses (5 % en 1955 et 7 % en 1977) et correspondent soit aux anciens casiers, soit aux terrains gagnés sur le Var et non encore occupés.

Le paysage a donc considérablement changé entre 1955 et 1977, il s'est fortement urbanisé dans le lit majeur lui-même.

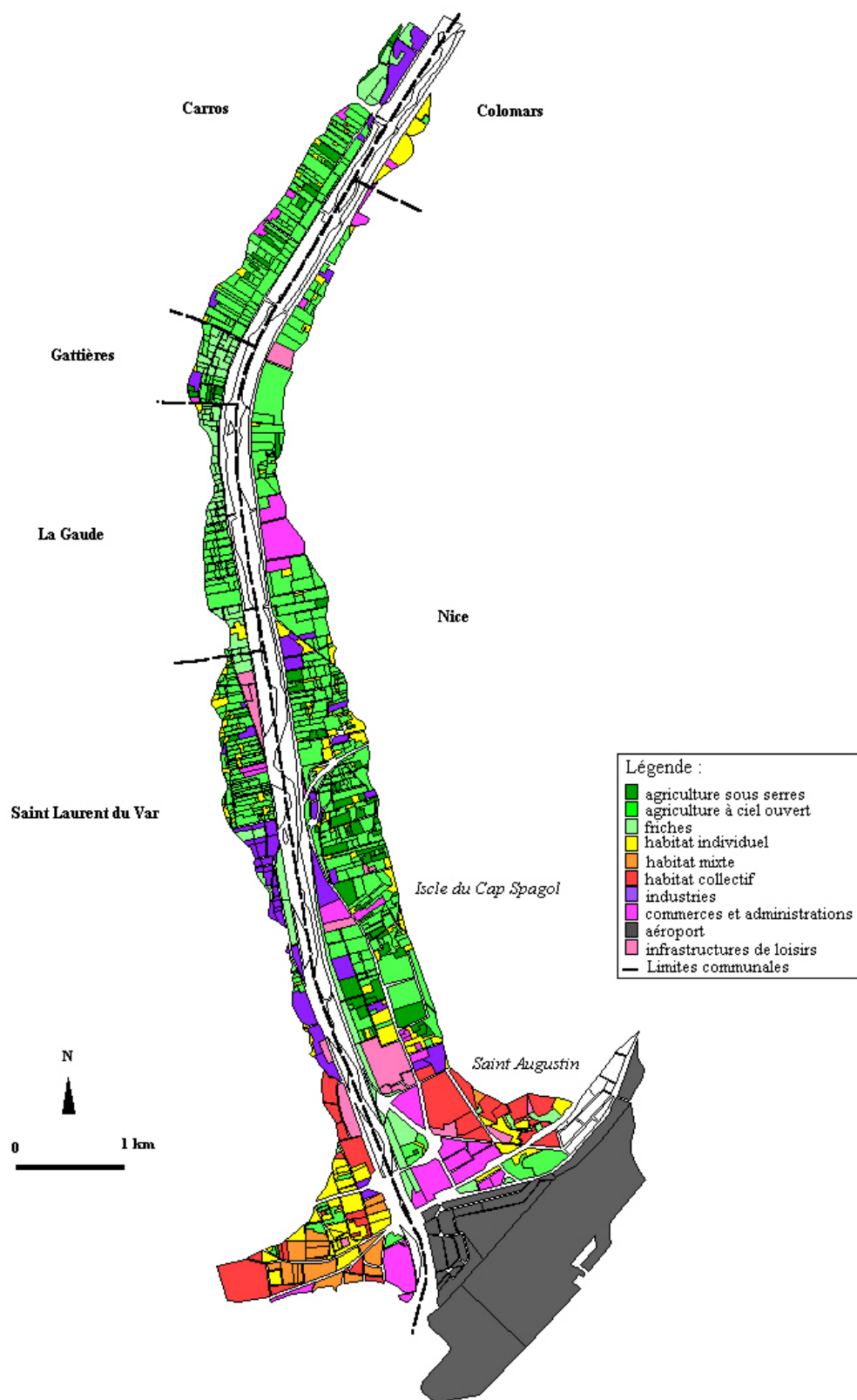


Fig. 2.9 : La carte de l'occupation du sol en 1977

2.2.2.4. L'occupation du sol en 1994

L'évolution de l'occupation du sol s'est faite selon une dynamique continue de 1955 à aujourd'hui. L'affectation des parcelles s'est modifiée selon un processus qui a fait passer un grand nombre d'entre elles de l'activité agricole en 1955, à une activité industrielle ou de service nécessitant de vastes espaces (bâtiment et travaux publics, activités de commerce en gros, entrepôts...), puis, à une activité tertiaire d'administration (Centre Administratif) de loisirs (stade, complexes sportifs...) et de commerce de détail.

Sur la carte de l'occupation du sol de 1994 apparaît la tendance déjà mise en évidence pour 1977. En effet, dans la basse vallée du Var, entre l'aéroport et Saint Isidore, le sol est presque totalement occupé par du bâti ou des activités du secteur tertiaire. En amont, on constate un mitage progressif de l'espace consacré à l'agriculture.

Le graphique de la figure 2.10 donne, en pourcentage, les surfaces du sol occupées par les différentes activités.

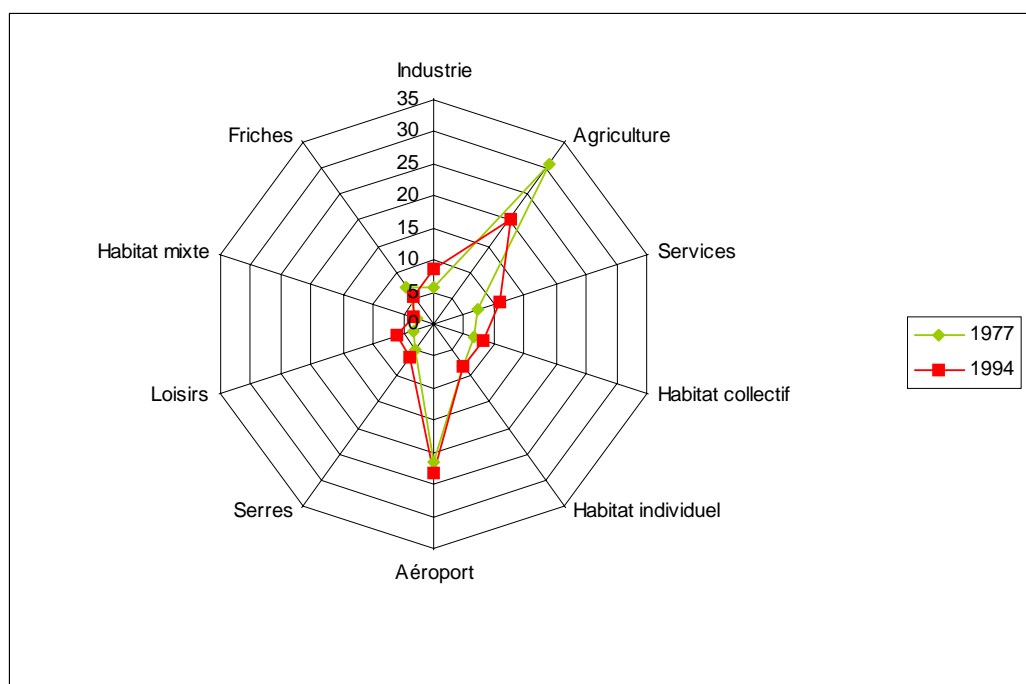


Fig. 2.10 : Pourcentage des différents types d'occupation du sol en 1977 et 1994

L'agriculture qui occupe 72 % du sol en 1955 passe à 31 % en 1977 et 20 % en 1994 ; les serres absentes en 1955 représentent 5 % de la surface totale en 1977 et 6 % en 1994. En revanche, les activités industrielles et de service occupent un peu moins de 2 % de la superficie en 1955, 13 % en 1977 et 23 % en 1994. De même, l'habitat de type collectif passe de 1,5 % de la superficie totale en 1955 à 9 % en 1977 et 11 % en 1994.

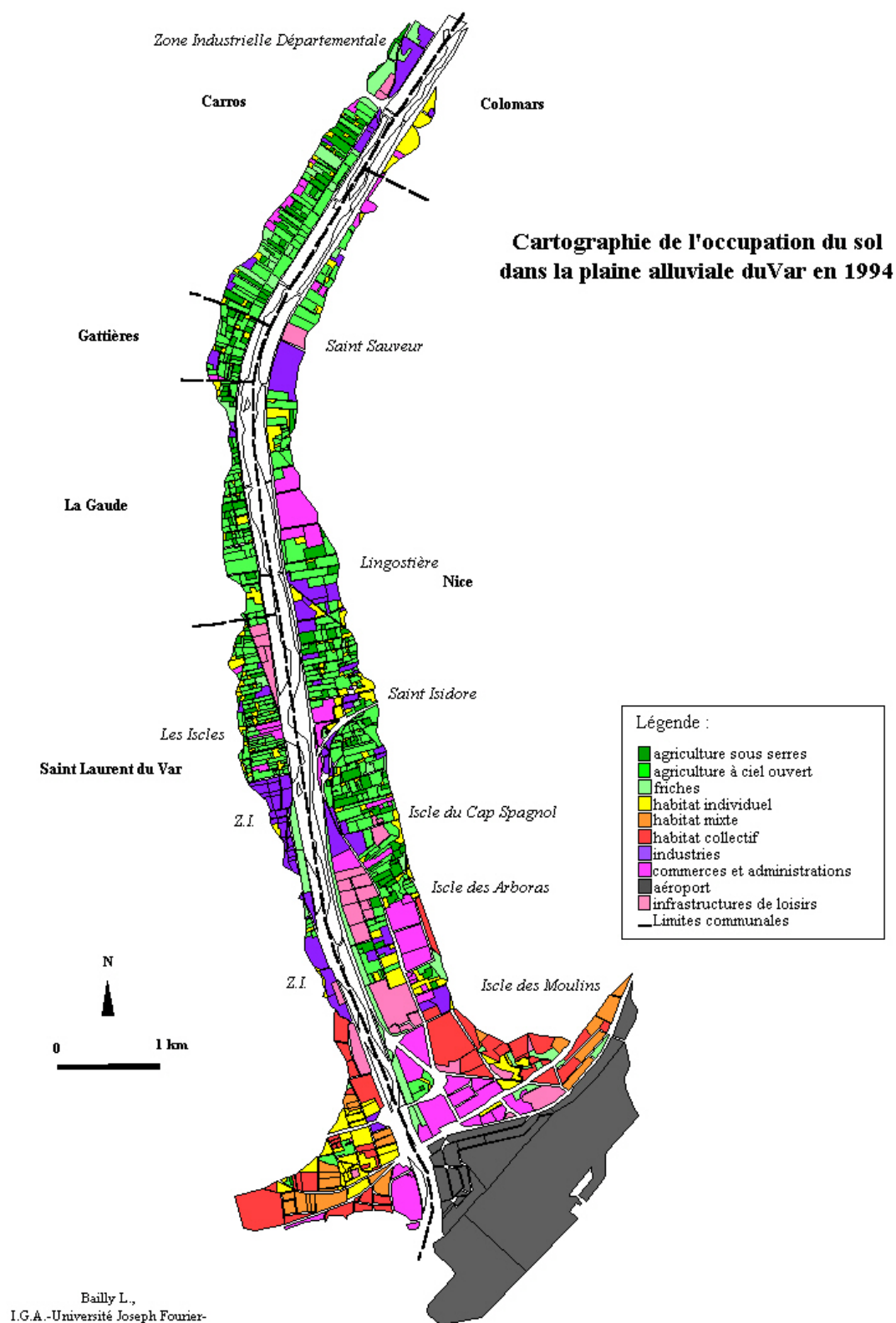


Fig. 2.11 : La carte de l'occupation du sol en 1994

2.2.2.5 L'évolution de l'occupation du sol de 1977 à 1994

Par une requête recherchant les parcelles qui ont changé de destination entre ces deux dates nous avons voulu visualiser l'évolution des activités dans la moyenne et la basse vallée du Var. La carte de la figure 2.12 montre les parcelles dont l'activité a changé.

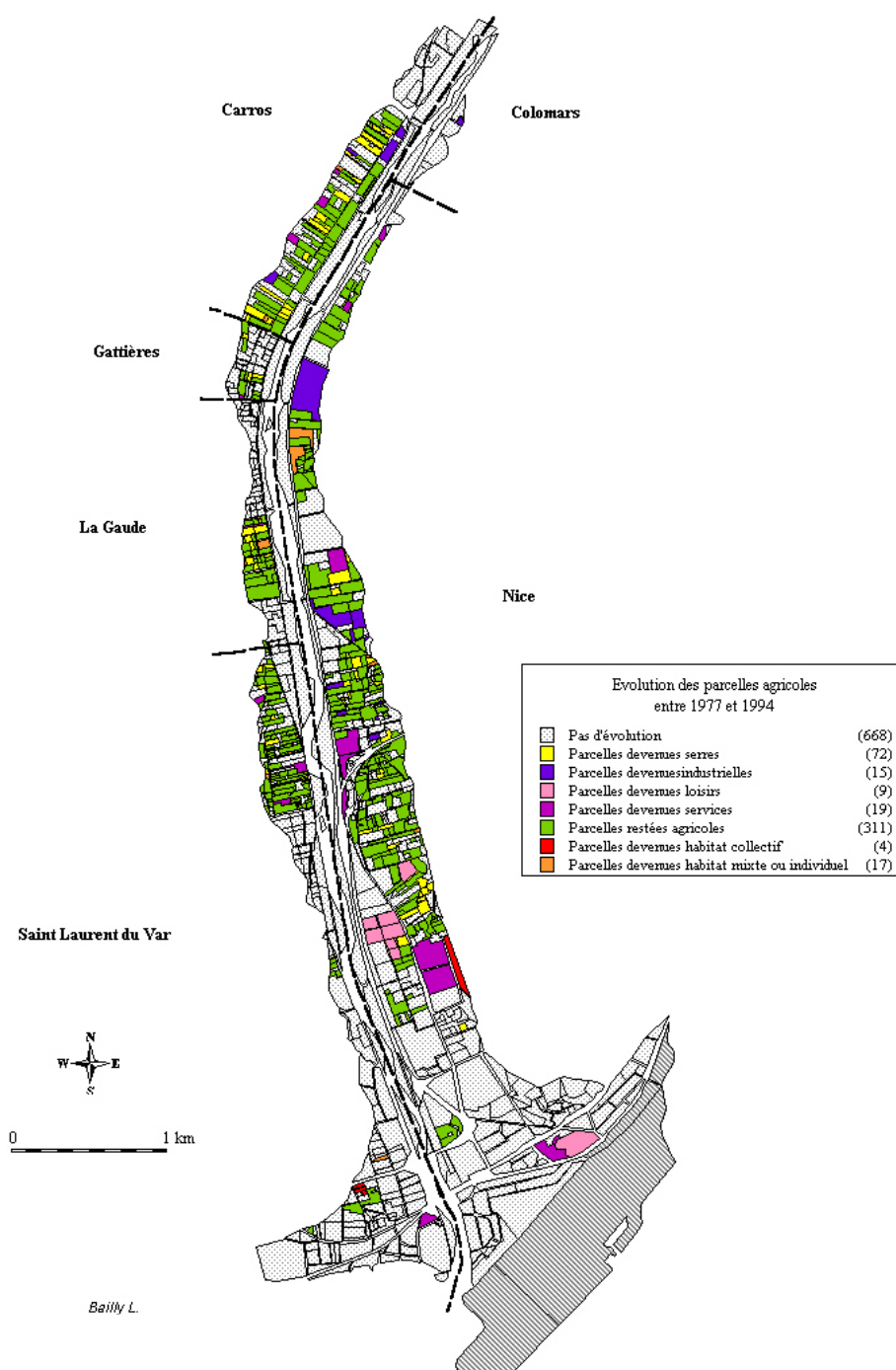
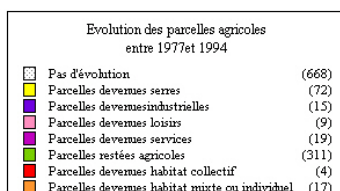


Fig. 2.12 : Carte de l'évolution de l'occupation du sol entre 1977 et 1994 dans la plaine du Var

Cette évolution est particulièrement visible dans le secteur de Gattières, représenté sur la figure 2.13. Cette partie de la plaine a été la dernière endiguée et est restée uniquement agricole plus longtemps que toute autre partie de la vallée. Son évolution s'est accélérée après 1985. On peut remarquer que de nombreuses parcelles à activité agricole de plein champs sont aujourd'hui occupées par des serres (72) ; 43 parcelles agricoles sont devenues des parcelles occupées par des activités de loisir, de service ou industrielle, enfin, 21 parcelles se sont urbanisées. Ce secteur représente admirablement l'évolution de l'occupation du sol.



Secteur de Gattières



Fig. 2.13 : L'évolution de l'occupation du sol entre 1977 et 1994 dans le secteur de Gattières : la moyenne plaine du Var

2.3. Des cartes élaborées : la vulnérabilité et l'aléa

2.3.1. Les variations de la vulnérabilité

Il nous a paru pertinent de dégager deux sortes de vulnérabilités :

- une vulnérabilité agricole,
- une vulnérabilité urbano-industrielle.

Ce choix a été fait en accord avec la dualité de cette plaine alluviale.

(N.B. : Actuellement, nous retenons la vulnérabilité afférente aux biens et aux moyens de production. La vulnérabilité liée au flux des personnes sera envisagée plus tard en tenant compte des comptages de passages routiers.)

La vulnérabilité agricole regroupe les friches, l'agriculture de plein champ et l'agriculture sous serres. Les friches sont très peu vulnérables car, par définition, ce sont des terrains qui ne sont pas utilisés.

Par contre, l'agriculture, qui dans la plaine est maraîchère, présente une assez forte vulnérabilité. En effet, selon le barème du département des Alpes-Maritimes, les légumes sont la culture ayant le plus fort produit brut par hectare : les laitues rapportent 80 000 francs par hectare et les tomates 180 000 francs par hectare. La vulnérabilité des cultures augmente parallèlement au rendement : le produit brut par hectare des plantations de tomates est de 180 000 francs en plein champ et de 540 000 francs sous abri. De plus, les endommagements subis par les serres sont très coûteux.

La vulnérabilité urbano-industrielle regroupe tous les autres modes d'occupation.

L'habitat collectif a une fonction résidentielle importante et une forte densité de population mais les constructions en hauteur protègent les biens et les hommes, par conséquent, les dégâts et la vulnérabilité, pour les biens, sont réduits. L'habitat individuel est moins dense mais plus vulnérable : les villas étant pour la plupart de plain-pied, les biens sont plus menacés.

Les services et l'aéroport ont une vulnérabilité supérieure à l'habitat, compte tenu des équipements sophistiqués qui s'y trouvent. Il en va souvent de même du secteur industriel. Les industries chimiques et pharmaceutiques très présentes dans la région sont d'autant plus vulnérables que les risques de pollution sont importants.

A partir de ces critères nous avons donné des degrés de vulnérabilité correspondant aux différents types d'occupation du sol. Nous avons affecté une valeur de référence à chaque type d'occupation du sol selon une échelle allant de 1 pour la vulnérabilité la plus faible à 6 pour la vulnérabilité la plus forte.

	vulnérabilité agricole	vulnérabilité urbano-industrielle
Friches	1	-
Agriculture à ciel ouvert	2	-
Agriculture sous serres	3	-
Infrastructures de loisirs	-	1
Habitat collectif	-	2
Habitat mixte	-	3
Habitat individuel	-	4
Commerces et administrations	-	5
Aéroport	-	5
Industries	-	6

Les degrés de vulnérabilité des modes d'occupation des sols

3.2.2. Les cartes de vulnérabilité

Les cartes de vulnérabilité réalisées à partir des critères que nous venons de définir sont présentées sur les figures 2.14, 2.15, 2.16. Elles montrent la diffusion de l'aval vers l'amont des secteurs de vulnérabilité forte en fonction de la variation des types d'occupation du sol au cours des 40 années de référence.

La diminution de la vulnérabilité agricole la plus faible est évidente, en revanche on note l'augmentation en pourcentage de secteurs à forte vulnérabilité (serres pour l'agriculture, industries, commerces pour le paramètre urbano-industriel). Cette dynamique induit une augmentation corrélative du risque pour un aléa identique. Cette analyse traduit le phénomène d'augmentation du risque par l'augmentation de la vulnérabilité.

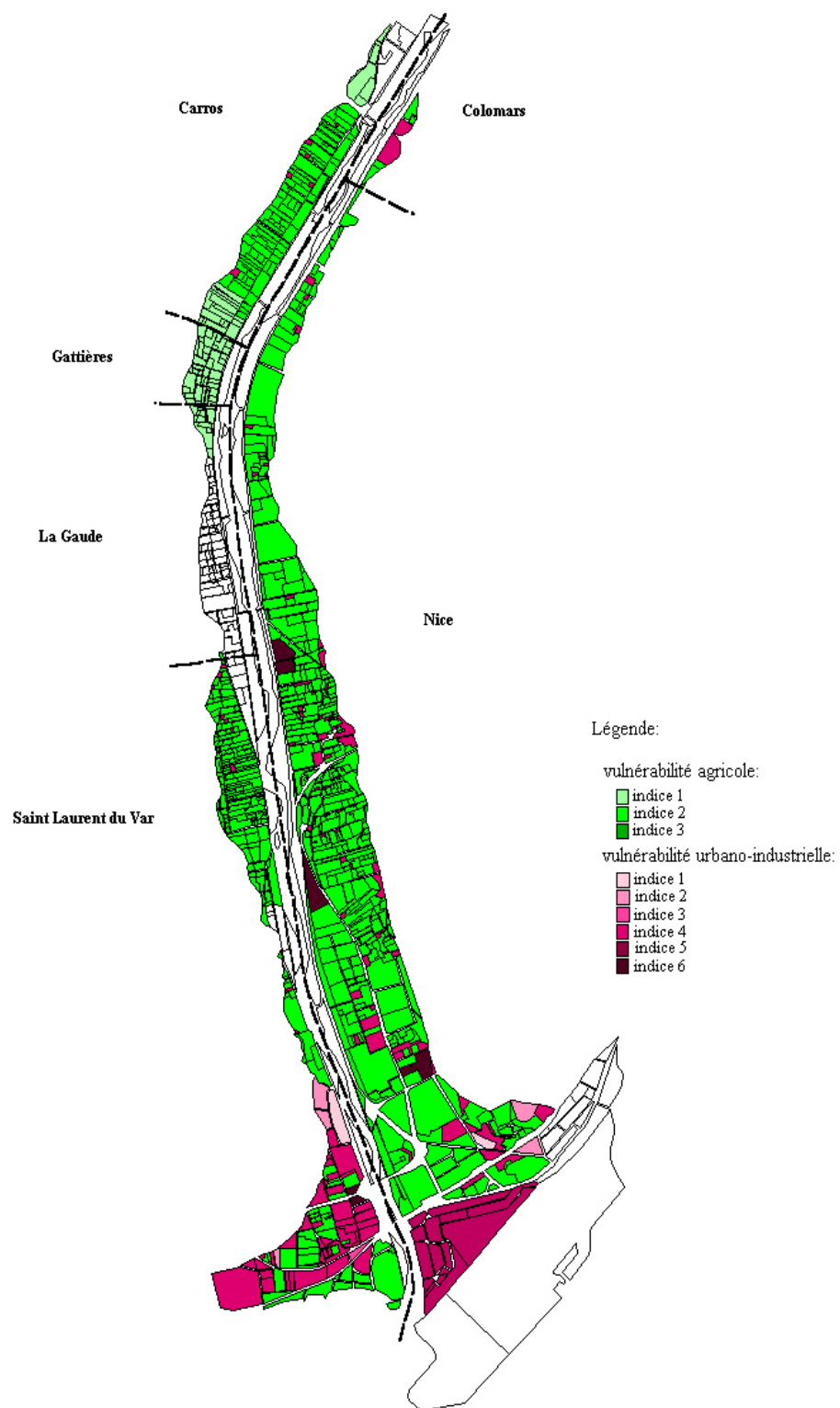


Fig. 2.14 : vulnérabilité en 1955

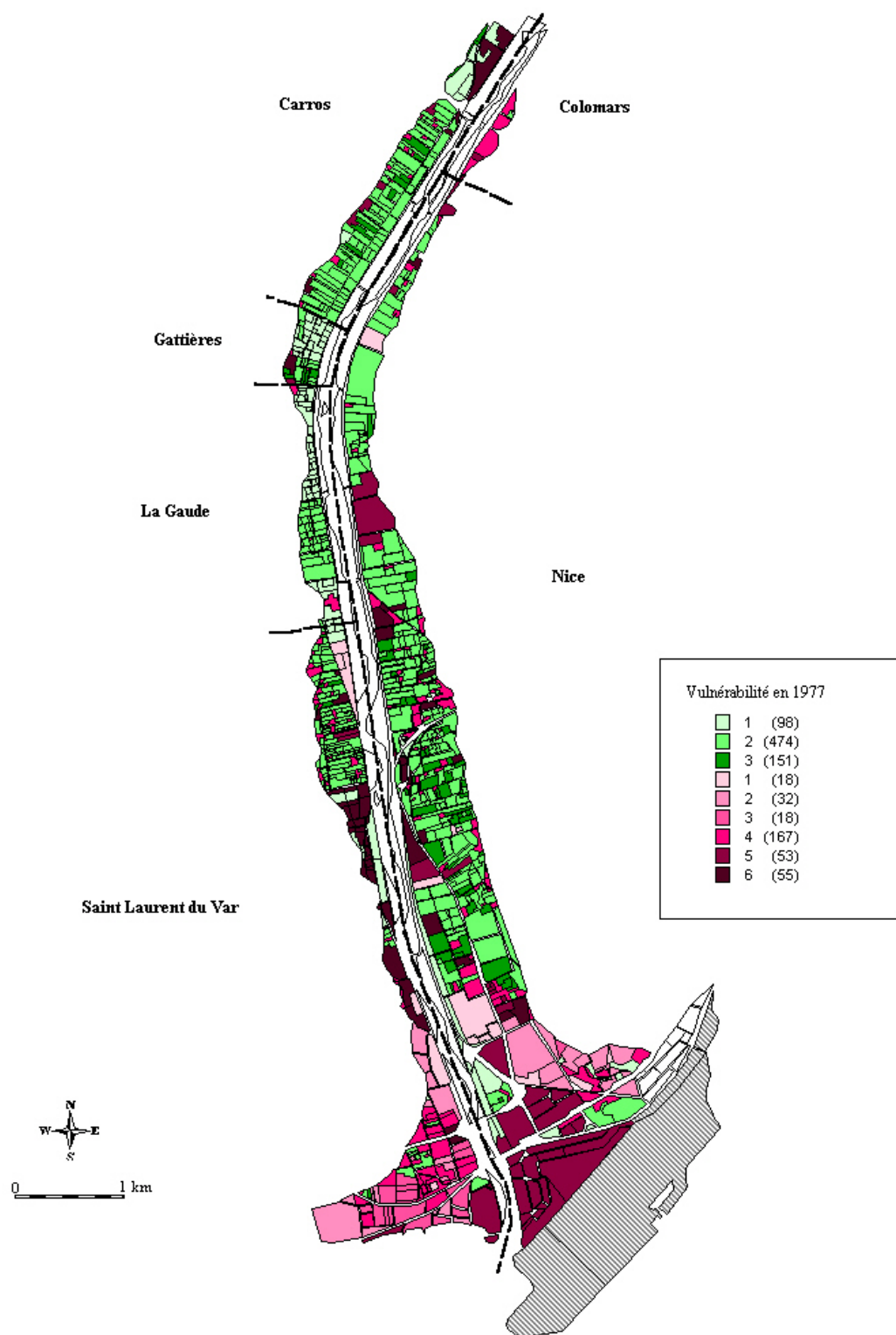


Fig. 2.15 : vulnérabilité en 1977

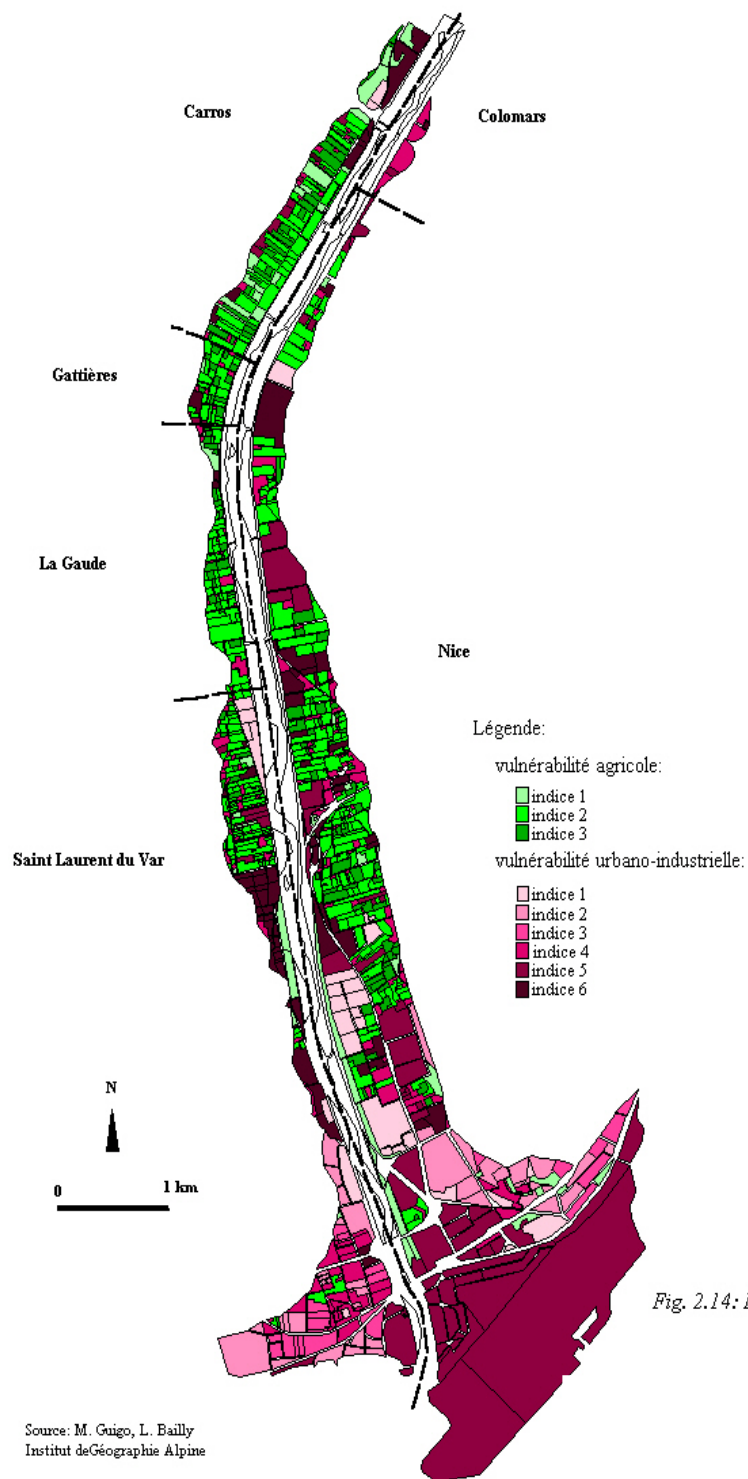


Fig. 2.14: La carte de vulnérabilité en 1994

Fig. 2.16 : vulnérabilité en 1994

Les diagrammes des figures 2.17 et 2.18 nous permettent de donner une représentation comparative de la distribution des vulnérabilités des trois années étudiées.

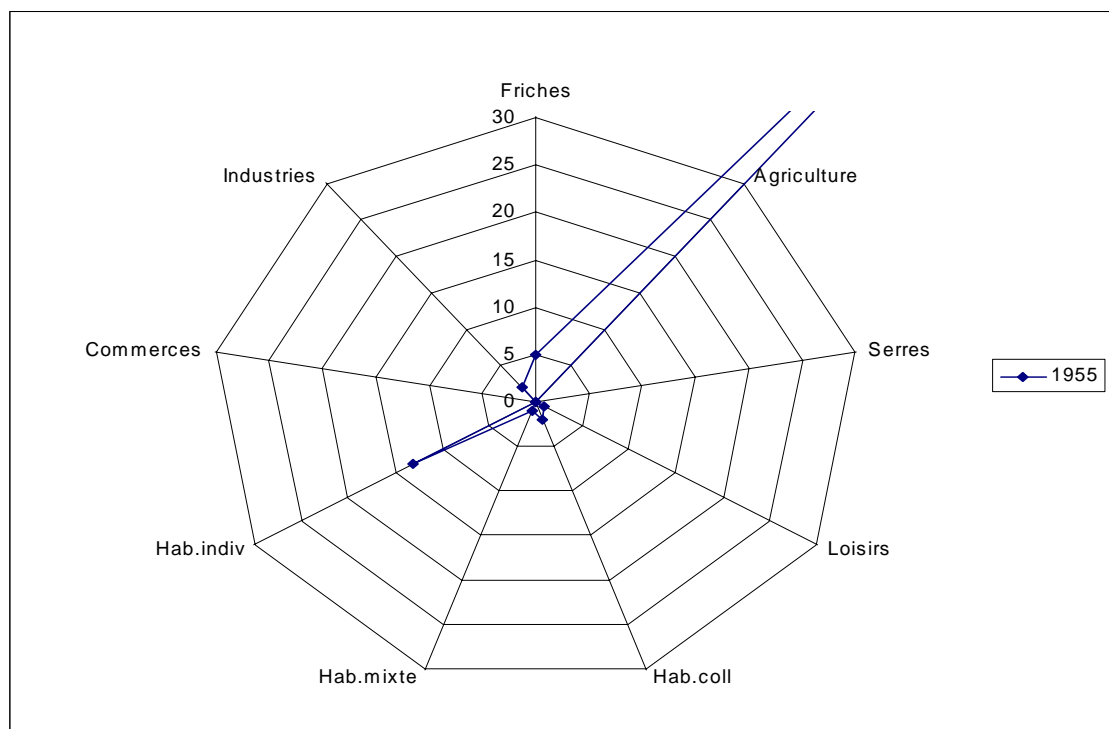


Fig. 2.17 : Pourcentages comparés des différents niveaux de vulnérabilité de 1955

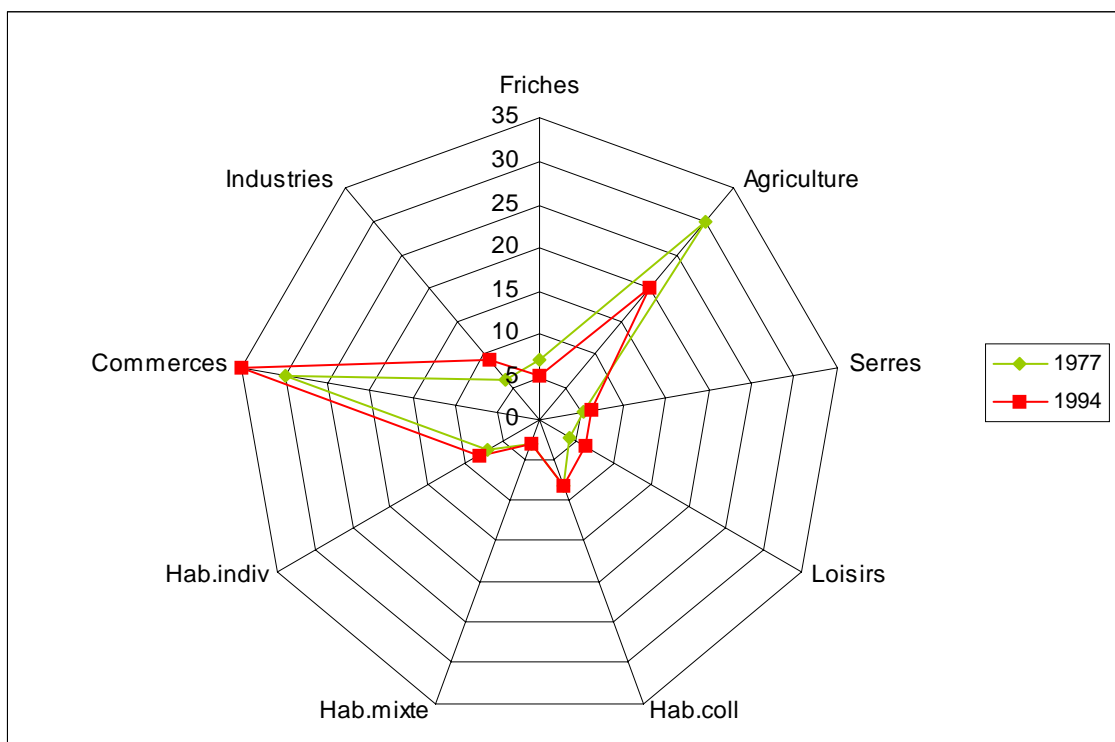


Fig. 2.18 : Pourcentages comparés des différents niveaux de vulnérabilité de 1977 et 1999

2.4. L'aléa

L'aléa retenu est celui établi par SOGREAH pour l'événement du 5 novembre 1994. En effet, comme nous l'avons indiqué plus haut, cet événement constitue un paroxysme et donc un bon calage pour la détermination du risque.

Les trois classes d'aléa qui ont été retenues correspondent à celles déterminées en fonction des critères du Ministère de l'Environnement et du CEMAGREF. Elles sont reportées dans le tableau suivant :

Vitesses/ Hauteurs	moins de 0,5 m	De 0,5 m à 1 m	1 m et plus
moins de 0,5 m/s	0	0	0
de 0,5 m/s à 1 m/s	0	1	1
1 m/s et plus	0	1	2

Nous avons affecté les valeurs de l'aléa au parcellaire. La carte de la figure 2.19 représente l'extension de ces différentes classes d'aléa.

La carte montre que les secteurs où l'aléa est fort se situent essentiellement :

- en rive droite depuis le pont de l'autoroute A8 jusqu'au-delà de Carros ;
- en rive gauche de l'aéroport à Sainte Marguerite.

En amont de Saint Isidore un secteur situé au-delà de la digue, en bordure des collines, présente anormalement un aléa fort. Cet état de fait est représentatif de l'inondation qui se fait à partir des vallons affluents qui drainent les pentes.

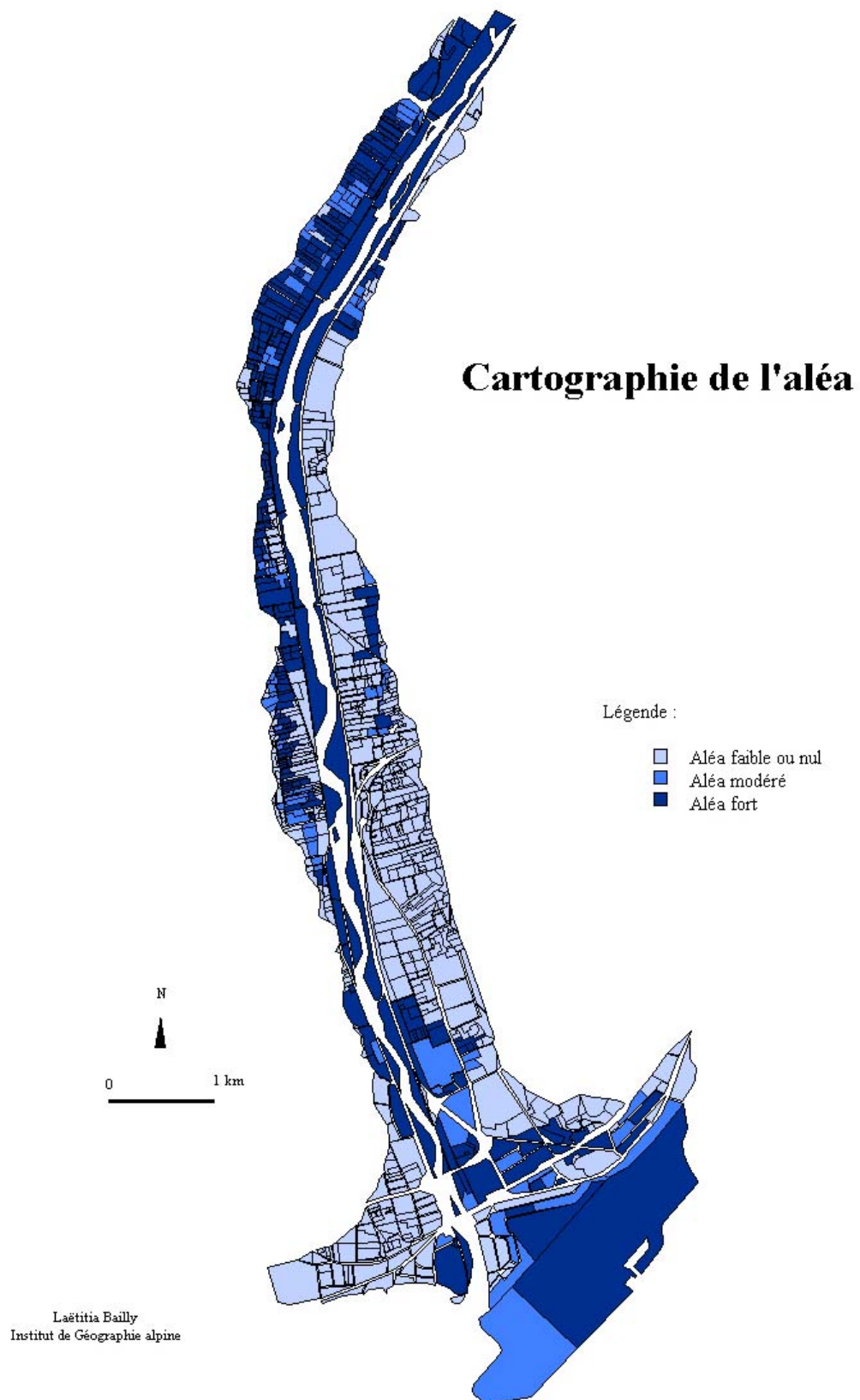


Fig. 2.19 : La carte de l'aléa (Source SOGREAH)



Le Var sur au niveau d'un seuil amont le 5 novembre 1994

Sur l'ensemble de la plaine, les trois classes d'aléa se répartissent de la manière suivante :

Niveau d'aléa	pourcentage
Aléa 1	48 %
Aléa 2	15 %
Aléa 3	37%

Ce tableau montre que plus de la moitié de la plaine entre Carros et l'embouchure sera à un niveau d'aléa faible et que 37 % de cette dernière seront concernés par un aléa considéré comme fort. De plus, il est certain que compte tenu de la vitesse de l'écoulement dans le lit majeur, lors d'un événement de cette ampleur, la vitesse du courant dans les zones inondées sera supérieure à 1 m/s, augmentant corrélativement l'impact de l'inondation. Cette affirmation est confirmée par l'étude réalisée pour la création de la nouvelle route nationale 202 qui prévoit des vitesses de 7 m/s lors de la crue centennale et au vu de la photographie ci-dessus prise le 5 novembre 1994.

Ce plan d'information nous permet ensuite par croisement avec ceux de la vulnérabilité de déterminer les cartes des risques.

2.4. Le risque

2.4.1. Méthodologie de recherche du risque

Pour cartographier le risque il est nécessaire de croiser la diffusion spatiale de la vulnérabilité avec celle de l'aléa.

Pour effectuer ce croisement et réaliser une carte du risque, nous choisissons une requête du SIG qui permet de superposer les deux plans d'information nécessaires.

Cela revient à créer des niveaux de risques à partir des niveaux des vulnérabilités agricole et urbaine et ceux de l'aléa. Les tableaux suivants montrent les résultats de ces croisements que nous avons codifiés pour effectuer une carte globale de niveaux de risque.

	Vulnérabilité agricole de niveau 1	Vulnérabilité agricole de niveau 2	Vulnérabilité agricole de niveau 3
Aléa 1	1	1	2
Aléa 2	1	2	3
Aléa 3	2	3	3

Vulnérabilité urbaine / Aléa	1	2	3	4	5	6
1	1	1	2	3	4	5
2	1	2	3	4	4	5
3	2	3	3	4	5	5

2.4.2. Cartographie du risque dans la basse vallée du Var

Ces requêtes sont réalisées pour les trois années de référence : 1955, 1977, 1994

En fonction des échelles de risque établies, la requête qui croise l'aléa et la vulnérabilité nous fournit pour 1955 une carte (fig. 2.20) où apparaît principalement un risque agricole sur les communes de Carros, Gattières et Saint Laurent du Var. Ce risque tient essentiellement à l'intensité de l'aléa. D'ailleurs dans le secteur de la Gaude, la digue de protection n'est pas encore construite, ce qui laisse ce secteur vide d'occupation et donc sans risque apparent, puisque la vulnérabilité est pratiquement nulle.

Le risque urbano-industriel est présent dans les quartiers de Saint Augustin et en bordure du «terrain d'aviation », base du futur aéroport.

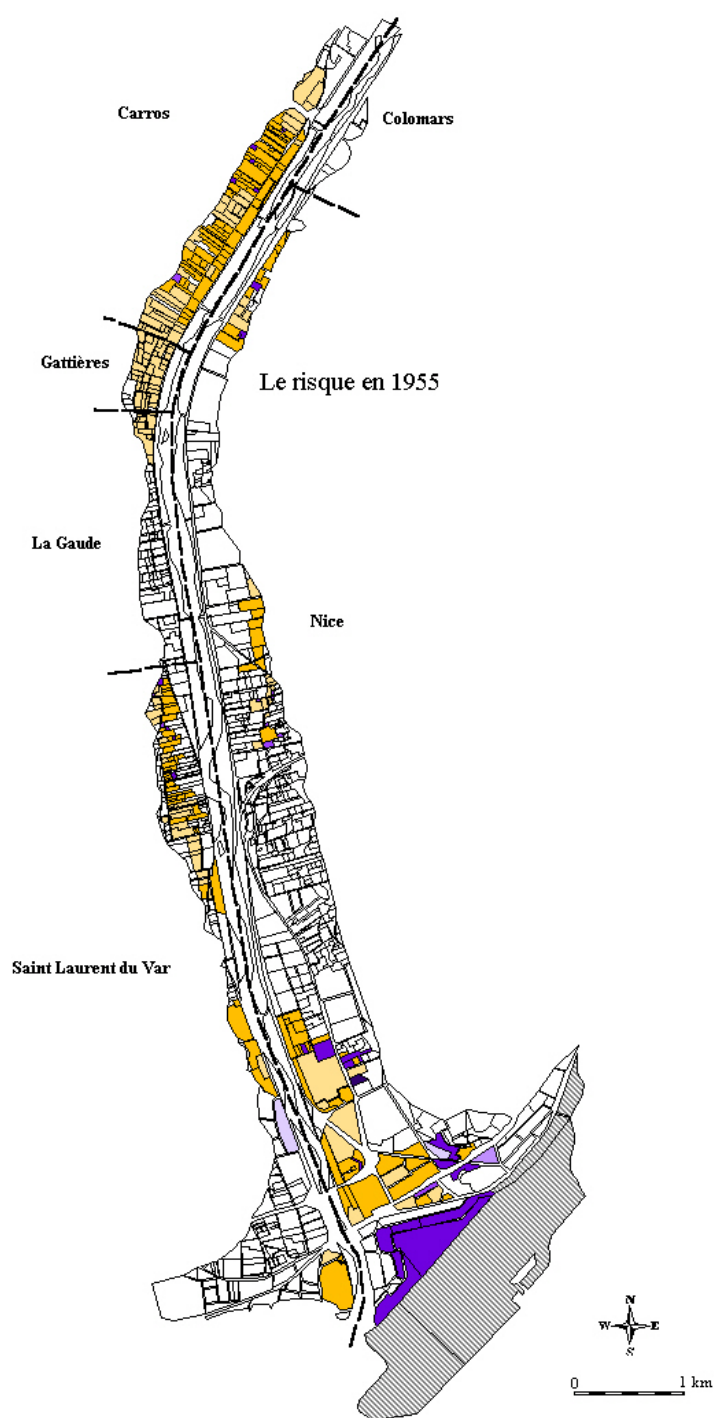


Fig. 2.20 : Carte du risque d'inondation dans la Plaine du Var en 1955

La carte de 1977 (fig. 2.21) réalisée de la même façon montre nettement l'accroissement du risque selon ces deux types d'évaluation :

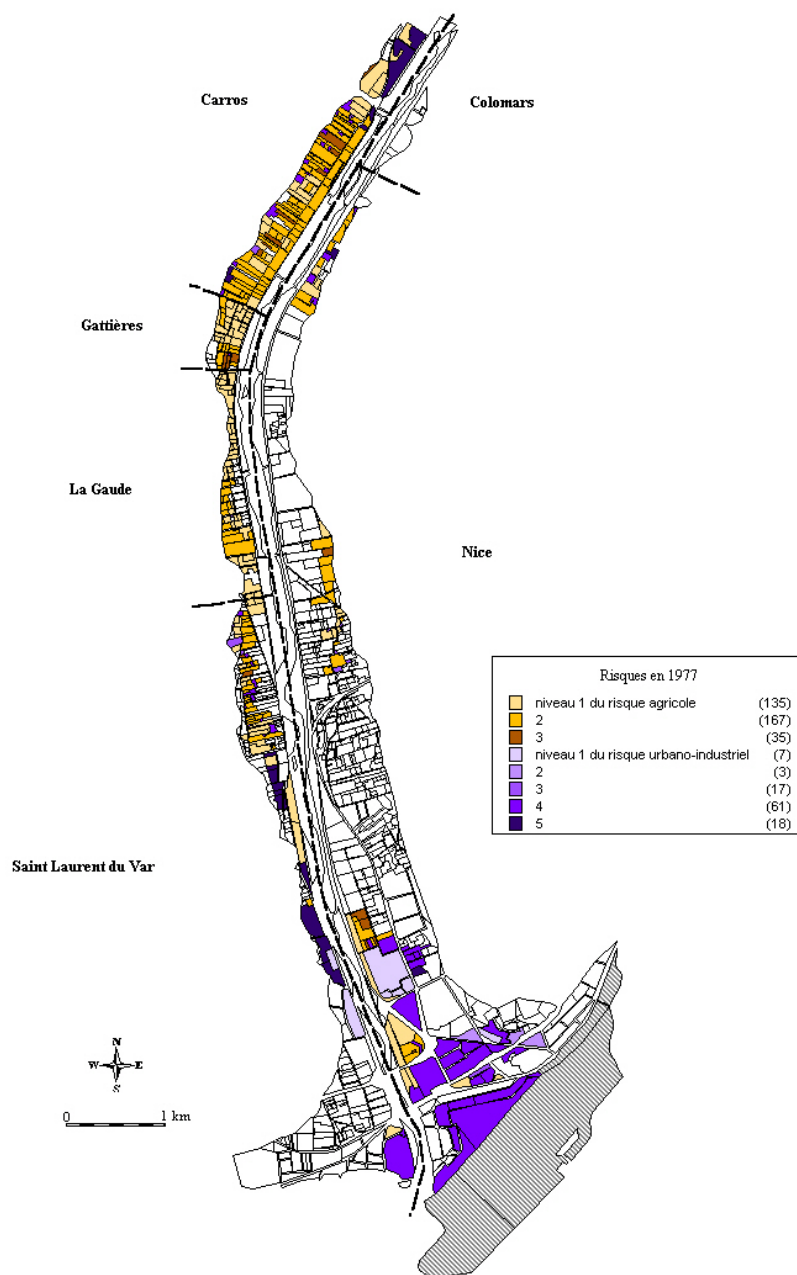


Fig. 2.21 : Carte du risque d'inondation dans la Plaine du Var en 1977

- le risque agricole s'étend sur une plus grande surface notamment dans le secteur de la Gaude, où la construction d'une digue de bordure a permis le développement de l'activité agricole. Par ailleurs le degré 3 du risque est atteint dans les secteurs où les serres ont remplacé les cultures de plein champ. C'est le cas essentiellement à Carros et Saint Laurent du Var.
- le risque urbano-industriel est lui aussi plus important. C'est le cas du secteur de la zone industrielle de Carros, de Saint Laurent du Var et des quartiers Ouest de Nice. Les

parcelles agricoles ont été remplacées par de l'habitat et des industries. D'emblée, le risque s'est accru par augmentation de la vulnérabilité, l'aléa restant constant.

La même carte réalisée pour 1994 (fig. 2.22) fait apparaître un accroissement du phénomène :

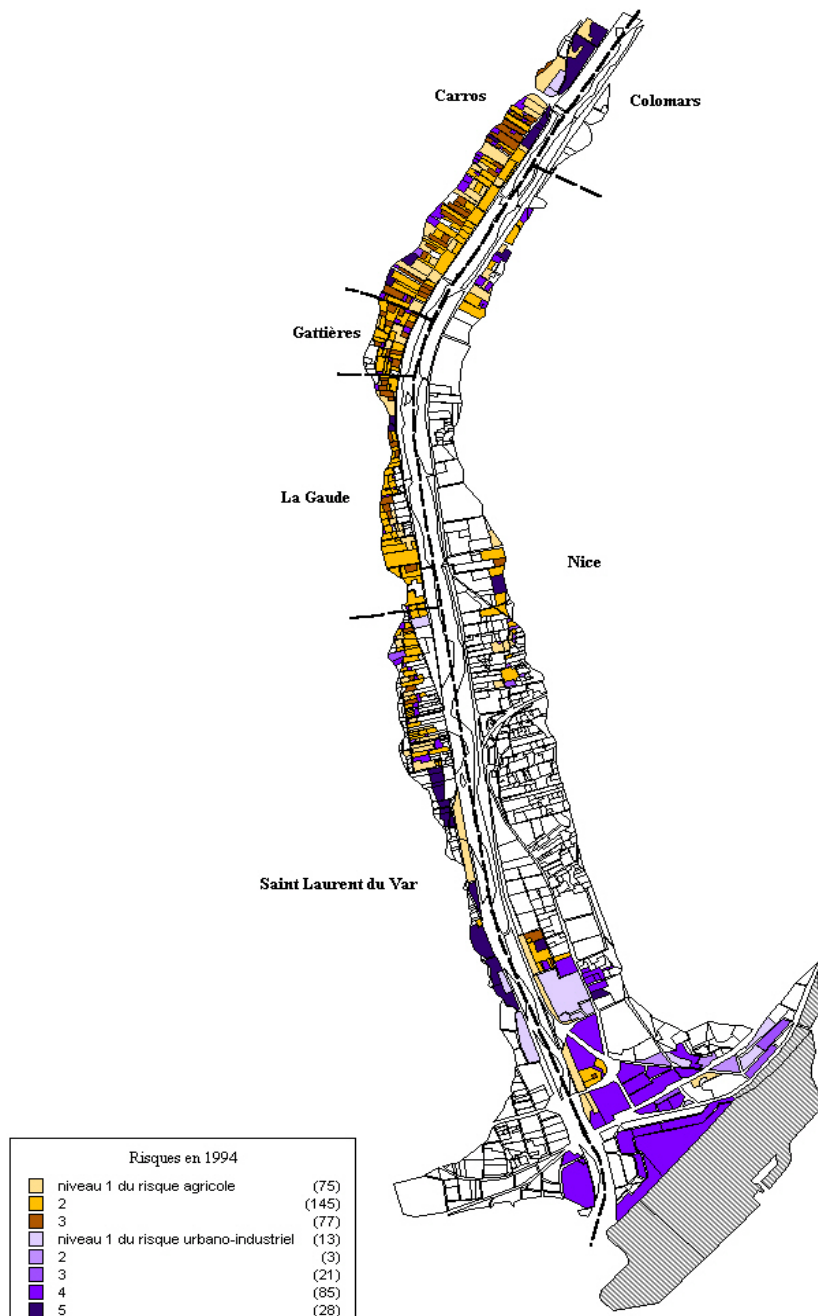


Fig. 2.22 : Carte du risque d'inondation dans la Plaine du Var en 1994

- les parcelles agricoles classées en risque important sont plus nombreuses, essentiellement en rive droite sur les communes de Carros, Gattières et la Gaude. Intercalées dans ce parcellaire agricole, les parcelles urbanisées sont plus nombreuses et induisent un risque accru.

- Il est net que sur les espaces inondables les parcelles urbaines et industrielles, à très forte vulnérabilité sont de plus en plus nombreuses : le risque augmente par changement de l'occupation. Cet accroissement du risque découle du conflit d'usage décrit auparavant. Il est une conséquence de l'urbanisation croissante de la plaine du Var.

Les deux diagrammes que nous présentons maintenant montrent la variation des surfaces concernées par le risque aussi bien agricole qu'urbano-insindustriel. On remarque que :

- le risque agricole de niveau 1 et 2, faible et moyen (aléa faible et vulnérabilité moyenne, avec des cultures de plein champ) diminue de 1955 à 1977, puis de 1977 à 1994. En revanche le risque de niveau 3 (aléa fort et serres) augmente de façon continue de 1955 à 1994. Cela traduit l'intensification des cultures et surtout l'extension de la culture sous serres, pour des niveaux d'aléa constants ;
- le risque urbain et industriel de niveaux 4 (aléa fort et vulnérabilité urbaine définie par un habitat individuel, des commerces et des administrations), augmente considérablement entre 1955 et 1977. Le risque de niveau 5 (aléa fort et vulnérabilité industrielle) augmente aussi. En surface l'augmentation semble moins importante, mais le risque en niveau est très fort.

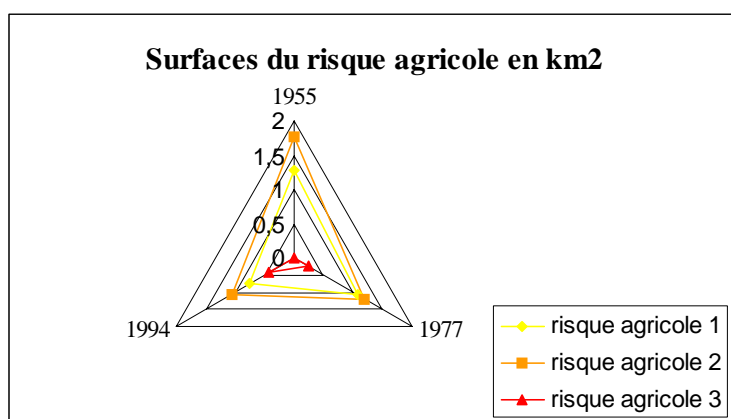
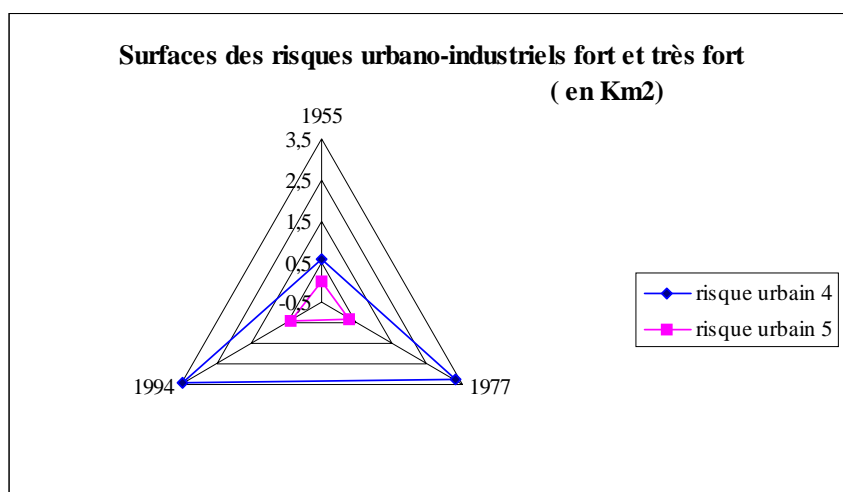


Fig. 2.23 : Surfaces du risque agricole

Fig. 2.24: Surfaces des risques urbano-industriels fort et très fort

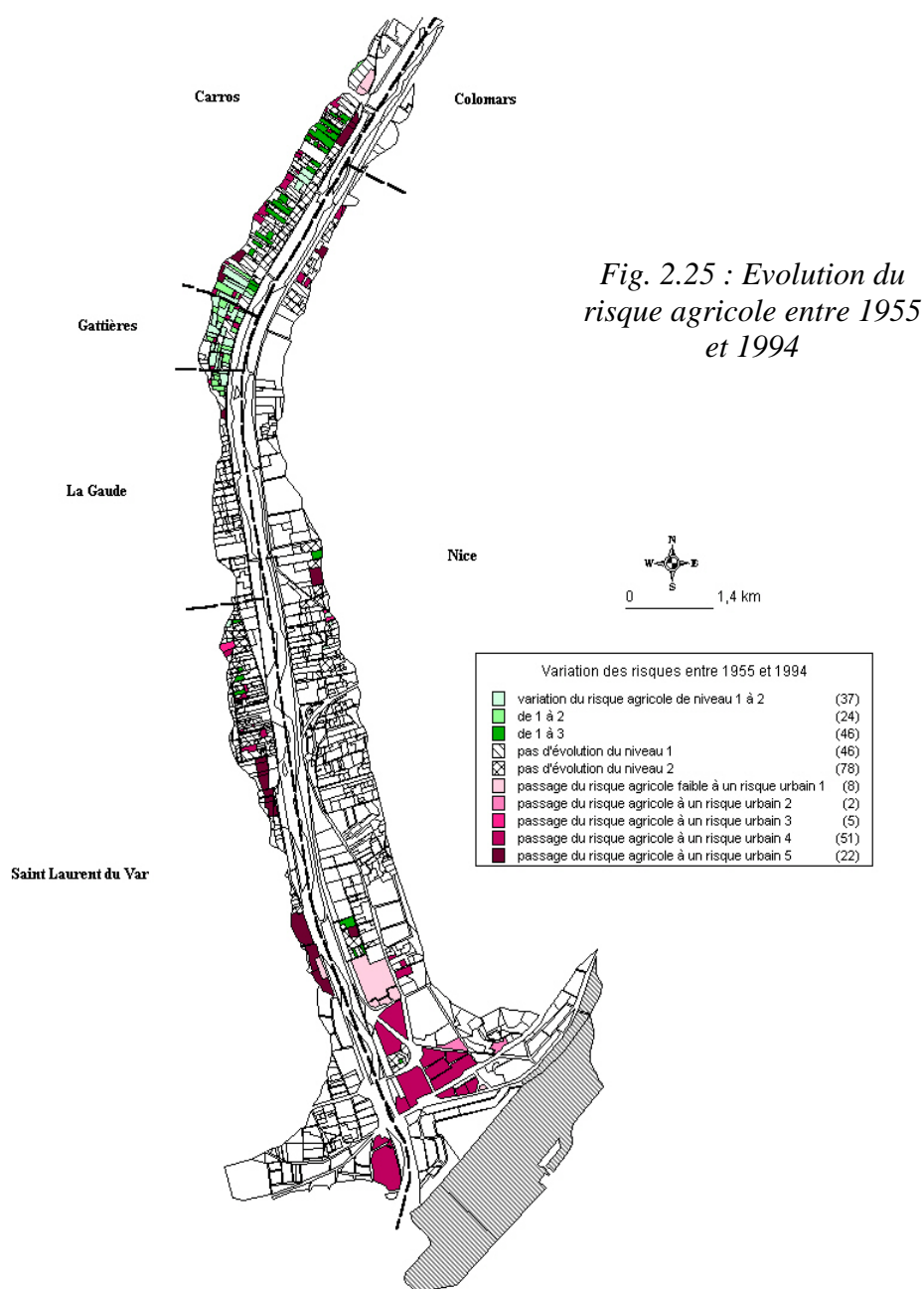


2.4.3. La dynamique diachronique du parcellaire : la croissance du risque

Par une requête nous recherchons les parcelles où le risque s'est accru en passant :

- d'un risque faible à un risque moyen,
- d'un risque moyen à un risque fort,
- d'un risque faible à un risque fort,

L'accroissement du risque sera révélé par le changement de l'usage du sol. L'illustration en est donnée pour le risque agricole et le risque urbano-industriel entre les années 1955 et 1994.



La carte de la figure 2.25 représente l'accroissement du risque par le passage d'un niveau de risque à un autre. Sur certaines parcelles l'activité reste de type agricole, leur couleur est verte, mais l'intensité du risque varie. Le risque peut passer de la classe 1 définie plus haut, à la classe 2 ou 3. Par exemple 46 parcelles agricoles sont passées d'un risque faible (1) à un risque très fort (3).

Par ailleurs, des parcelles agricoles, ont été urbanisées. Sur 88 parcelles, l'activité agricole a disparu, elles ont acquis une vocation urbaine et industrielle et 73 d'entre elles ont vu le risque s'accroître considérablement en fonction des critères que nous avons définis. Elles sont passées d'un niveau risque faible à un niveau de risque urbano-industriel de niveau élevé 4 et 5 soit fort et très fort. Ce phénomène est particulièrement visible dans la zone aval du secteur étudié, l'urbanisation a presque totalement envahi la vallée du Var. Le conflit d'intérêt n'existe plus, l'évolution est terminée.

Entre 1955 et 1994 le risque agricole s'est accru notamment dans les secteurs de Carros. Le « zoom » présenté sur la carte de la figure 2.26 montre un des secteurs les plus démonstratifs de cet état de fait. Les parcelles colorées en vert sombre montre une augmentation importante du risque agricole. Alors que certaines parcelles sont colorées en rouge et donc sont passées d'une activité agricole à une activité industrielle avec un considérable accroissement du risque. Ce secteur est très démonstratif des conflits d'intérêts : les parcelles agricoles sont souvent couvertes de serres pour une activité agricole de type presque industriel et certaines d'entre elles connaissent un changement de destination et deviennent des parcelles vouées à l'habitat ou à une activité industrielle.

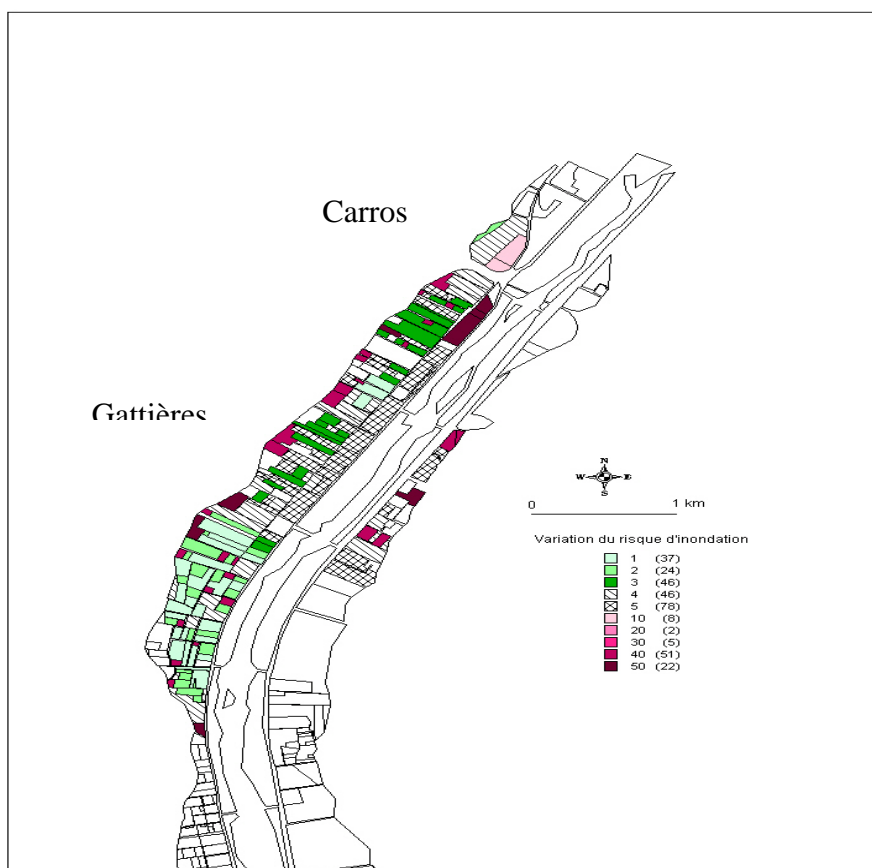


Fig. 2.26 : Carte d'évolution du risque dans le secteur de Carros

Cette étude montre que le risque croît de manière continue, du risque agricole le plus faible au risque urbano-industriel le plus fort. Le conflit d'usage se traduit à l'évidence par une dynamique continue du risque. Le passage d'une parcelle occupée par de l'agriculture de plein champ, à des serres, puis par des entrepôts puis de l'industrie et même à de l'habitat traduit un processus roulant de croissance de vulnérabilité et donc du risque par glissement continu du type d'occupation du sol, puisque l'aléa été fixé à celui engendré par la crue centennale recalculée après l'événement de 1994.

Bibliographie

GUIGO M. et Le BERRE M. (1989), Ecrire un modèle de simulation systémique: les impact des aménagements sur le comportement de la nappe alluviale de la basse vallée du Var, *Collection Grenoble Sciences*, 86 pages.

GUIGO M., (1991), Etude comparée des écoulements sur les rivières gênoises et de la région niçoise: étude du risque d'inondation, *Conseil Général des Alpes Maritimes*, 62 p.

GUIGO M., CHERY J.P., (1997) Etude de l'impact des travaux de lutte contre les crues de l'Isère à Grenoble, *Association de défense des digues de l'Isère*, 84p.

GUIGO M., BAILLY L. (1998), Systèmes d'aide à la décision pour la gestion spatiale en fonction des risques d'inondation à Nîmes, *Dossier et Atlas, Mairie de Nîmes*, 72 p.

**Vulnérabilité des quartiers Est de la ville de Nice
menacés par le Paillon**

Christine Voiron-Canicio, Florence Olivier

3.1. Vulnérabilité et vulnérabilité urbaine

Aujourd'hui, la vision classique du risque réduit à l'aléa est de plus en plus délaissée pour une vision combinant aléa et vulnérabilité, mais cette deuxième composante fondamentale du risque est moins facilement cernée que la première. Aussi convient-il de rappeler la manière dont la vulnérabilité est appréhendée dans les recherches récentes en sciences humaines, avant de présenter notre conception de la vulnérabilité urbaine face au risque inondation.

3.1.1. De la notion de vulnérabilité au concept systémique

La délégation aux Risques Majeurs définit la vulnérabilité comme « *le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux* ». Les enjeux sont, soit des êtres humains menacés, soit, des biens, privés ou publics, des activités, des patrimoines (naturels ou architecturaux) susceptibles d'être endommagés.

En économie, la conception usuelle assimile la vulnérabilité à une grandeur ; le volume des biens, activités et équipements est multiplié par les valeurs unitaires, puis un taux de perte est appliqué à cette valeur totale, à l'aide d'une relation d'endommagement, en prenant en compte les paramètres d'inondation (hauteur et durée de la submersion). Ainsi est estimé le dommage ponctuel associé à une crue de fréquence donnée. Des travaux récents ont enrichi le concept de vulnérabilité. Les recherches de COMBE (1999) situent l'évaluation de la vulnérabilité dans le champ de la micro-économie, en introduisant le concept de risque maximal acceptable. Les agents économiques qui s'installent ou se maintiennent dans une zone inondable, le font en évaluant, de façon plus ou moins rationnelle, une limite d'acceptabilité qui est un niveau de risque associé à une limite de perte maximale acceptable. Cette limite dépend de plusieurs facteurs, du type de bénéfice ou d'objectif recherché par l'agent économique, ainsi que des contraintes diverses inhérentes au risque lui-même, mais également, propres à chaque individu, enfin, des ressources mobilisables pour s'adapter au risque d'inondation. L'analyse de la vulnérabilité prend alors en compte la globalité du système de relations « activité-comportement-attitude » des agents, vis à vis de l'inondation.

D'autres chercheurs considèrent que la vulnérabilité dépend de la propension à subir des dommages, et donc, de la capacité de réponse d'une société face à l'événement de type aléa. Ainsi, la vulnérabilité est décrite comme la capacité d'une personne ou d'un groupe à anticiper, tenir le coup, résister et reconstruire après les impacts d'une catastrophe (BLAIKIE et alii, 1994).

3.1.2. Vulnérabilité urbaine

La vulnérabilité urbaine face au risque d'inondation, possède des caractères spécifiques qui tiennent aux particularités des villes et à leur fonctionnement : morphologie de la voirie et sens de circulation, intensité variable du trafic automobile, modalités de stationnement, multiplicité des points de centralité (gares, centres commerciaux, établissements scolaires, hospitaliers, culturels et sportifs). La vulnérabilité des espaces urbains dépend des multiples interactions spatiales existant dans le champ d'inondation et autour de lui, en période de risque comme en temps de crise.

Notre conception de la vulnérabilité urbaine est, de ce fait, systémique et spatiale. Deux types d'espaces urbains sont à distinguer : les espaces à enjeux statiques et les espaces à enjeux dynamiques, qui sont étroitement interreliés, comme nous allons le démontrer.

3.1.2.1. Les espaces à enjeux statiques

Ces espaces sont des sites qui existent de manière permanente en des points précis de la ville et qui se singularisent par une vulnérabilité élevée, soit, parce qu'ils concentrent des populations dépendantes, soit, parce qu'ils tiennent un rôle majeur dans la gestion des crises.

Ces espaces se subdivisent en trois sous-groupes.

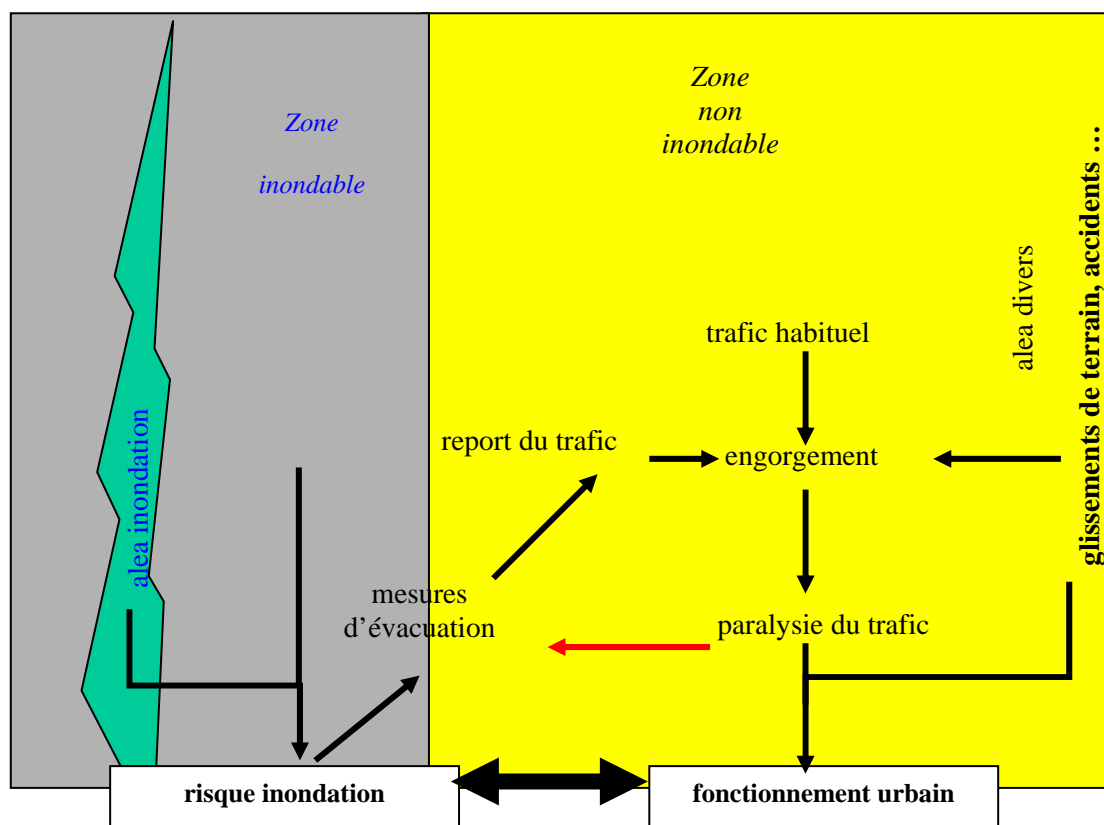
- L'un est représenté par les crèches, les écoles, les hôpitaux et les maisons de retraite qui regroupent des catégories de populations dont la mobilité et l'autonomie sont réduites et qui, de ce fait, sont incapables de se protéger ou de se conformer aux règles de sécurité (malades et blessés, personnes âgées et enfants).
- Les postes de secours et de police, les casernes de pompiers, les gendarmeries ainsi que les centraux électriques représentent un deuxième sous-groupe d'enjeux, de par leur rôle dans les situations de crise.
- Enfin, les lieux de concentration temporaire de population, tels que les établissements d'enseignement, les centres commerciaux, les centres culturels ou sportifs, constituent un troisième sous-type, moins dépendant que le premier mais dont les effets de masse peuvent être difficiles à contrôler en temps de crise.

3.1.2.2. Les espaces à enjeux dynamiques

L'une des dimensions majeures de l'espace urbain est l'intensité des flux. « *C'est la mise en mouvement qui fait la ville, et le risque proprement urbain est celui de l'interruption des flux : l'embouteillage, la saturation, la pénurie* » (J-C. Lavigne, 1995). Nous considérons que les espaces à enjeux dynamiques sont des axes de circulation dans lesquels le trafic automobile amplifie le risque inondation. Il s'agit des axes directement menacés par la montée des eaux mais également des artères voisines, qui ne sont pas directement exposées, mais qui, du fait de leur interconnexion aux axes inondables, jouent un rôle majeur, en phase d'alerte comme en temps de crise.

Si la perte totale ou partielle de mobilité dépend de l'âge et de l'état de santé des individus, il est des situations qui entraînent aussi une forte exposition à l'aléa et une forte vulnérabilité des populations du fait d'une perte momentanée de mobilité. C'est le cas des situations en milieux confinés : parkings et tunnels souterrains, mais également des artères sans échappatoire ou bien engorgées, où la moindre entrave à la mobilité compromet la rapidité d'évacuation des personnes autant que l'acheminement des secours. Or, les espaces urbains sont des lieux propices à de telles situations, par l'importance des flux de circulation et les embouteillages qu'ils provoquent à certaines heures de la journée.

Les analyses des incidences du trafic automobile sur la vulnérabilité urbaine en phase d'inondation ne sont pas fréquentes alors que les conséquences des situations de thrombose sur la voirie peuvent avoir des conséquences dramatiques. Aussi avons-nous souhaité privilégier cet aspect de la vulnérabilité urbaine dans l'étude sur le Paillon dans Nice.



Christine Voiron-Canicio – ESPACE-Nice

Fig. 3.1 : Le système du risque urbain

3.2. Risque inondation et risque urbain dans les quartiers de Nice traversés par le Paillon

3.2.1. Les inondations du Paillon : crues récentes et plan de prévention des risques naturels prévisibles d'inondation

Le Paillon est un fleuve côtier qui draine un bassin versant de 250 km². Il est composé de plusieurs affluents, le Paillon de l'Escarène, le Paillon de Contes, le Paillon de Levens et le Paillon de Laghet. La basse plaine alluviale est aujourd'hui totalement urbanisée, le fleuve traverse en effet les quartiers Est de la ville de Nice avant de se jeter dans la mer. Sur les 2 derniers kilomètres, le Paillon est entièrement recouvert. Une portion du lit située entre le pont de la voie ferroviaire Nice-Coni et le pont V. Auriol a été également recouverte pour recevoir les infrastructures du nouveau Lycée de l'Est.

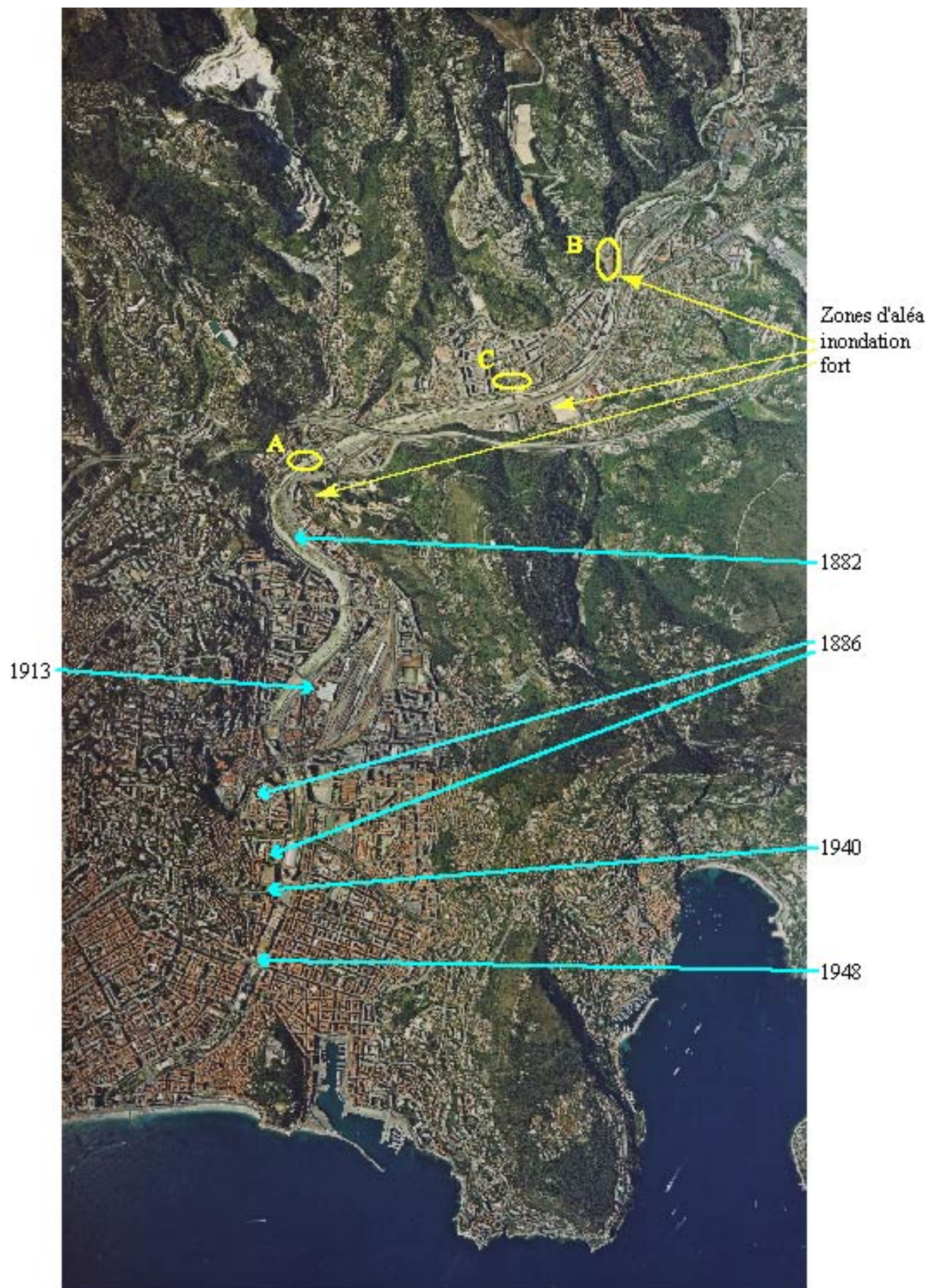


Fig. 3.2 : Le Paillon dans Nice : localisation des risques forts d'inondation (A,B,C) et de quelques débordements

D'un mince filet d'eau, le Paillon peut enfler à 700 m³/s comme il le fit en 1882, 1940, 1957 (crue centennale). Jacques de Saint-Seine estime qu'il pourrait atteindre 1500 m³/s (crue millénale), comme cela a dû se produire en 1601 et 1603. Le Paillon déborderait alors, à partir du Palais des Expositions, dans quelques rues de la rive droite et surtout sur la rive gauche où il envahirait le quartier du port.

Rappel des dernières crues du Paillon à Nice (Fig. 3.2)

- 27 octobre 1882, le Paillon déborde au lieu dit Bon Voyage
- 10 novembre 1886, les quartiers de Riquier et de l'Arbre Inférieur sont inondés.
- 1913, une crue emporte le pont des abattoirs.
- 17 novembre 1940, le Paillon inonde Drap et déborde à Nice ; la place Risso est recouverte d'eau et les immeubles du quai Gallieni sont évacués.
- 1948, le Paillon déborde en centre-ville, sur le boulevard Carabacel et l'avenue de Paris.
- Le 14 octobre 1979, il emporte le pont reliant l'Ariane à la Trinité.
- Automne 1994, la route desservant la zone industrielle de Contes (à 17 km de l'embouchure du fleuve) est emportée en deux endroits.

Les crues récentes se sont produites soit lors d'épisodes orageux très violents, soit lors d'épisodes pluvieux de 3 à 4 jours finissant par une pluie intense de 140 mm.

Le plan de prévention des risques naturels prévisibles d'inondation du Paillon élaboré par la Préfecture des Alpes-Maritimes a été approuvé le 17 novembre 1999. En 1989, la commune de Nice avait fait l'objet d'une étude hydraulique en vue de l'établissement d'un PER décrété par arrêté préfectoral le 19 février 1986. « Depuis, la morphologie du Paillon a évolué de façon importante. Le cours d'eau a subi divers recalibrages, tandis que le bassin versant était sujet à une imperméabilisation grandissante. Pour prendre en compte ces récentes modifications et les nouvelles directives en matière de prévention des risques inondation, il a été décidé d'établir un plan de prévention des risques prévisibles sur l'ensemble du bassin versant du Paillon et des 9 communes limitrophes de ce cours d'eau. » (DDE des Alpes-Maritimes, service Aménagement Urbanisme Opérationnel, Rapport de présentation du PPR naturels prévisibles d'inondation du Paillon, Août 1999).

Le périmètre d'étude correspond au bassin inondable lors d'une crue millénale. Les crues du Paillon ayant des périodes de retour inférieures à 100 ans, c'est la crue centennale qui a été retenue comme crue de référence pour la délimitation des zones inondables. Le débit centennal est estimé à 750 m³/s au droit du Palais des Expositions (Fig. 3.3).

Il ressort du PPR que « la crue centennale, parfois en limite de débordement, reste confinée dans le lit mineur et est classée en risque fort ».

Il apparaît également que,

- à l'entrée de la couverture du Palais des Expositions, l'écoulement se déverse dans le tunnel routier situé dans l'arche de la rive gauche, à partir de 700 m³/s (T = 100 ans) ;

- en amont de la couverture, la rive gauche subit les premiers débordements à partir de $750 \text{ m}^3/\text{s}$ (Place de Tende), ($T = 100 \text{ ans}$), en rive droite, les déversements commencent à être observés pour $850 \text{ m}^3/\text{s}$;
- en amont du pont Vincent Auriol, la capacité du lit mineur est très importante. La crue de $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ ne déborde pas ; la pénétrante en rive gauche entre le pont V. Auriol et les ponts Jumeaux (Tigre et Lion) est insubmersible pour la crue de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$;
- entre les ponts Jumeaux et le pont A. France, le débit de période de retour 100 ans retenu est de $690 \text{ m}^3/\text{s}$; la pénétrante en rive gauche est inondable par l'aval, à partir de $400 \text{ m}^3/\text{s}$; à partir de $400 \text{ m}^3/\text{s}$, ces débordements sont généralisés entre la passerelle de l'Ariane et les ponts Jumeaux ($40 < T < 60 \text{ ans}$) ; en rive droite, le terrain de jeu situé en amont de la passerelle de l'Ariane est inondé à partir de 650 à $700 \text{ m}^3/\text{s}$ ($80 < T < 100 \text{ ans}$) ;
- entre le pont A. France et la voie SNCF, le débit centennal retenu est de $630 \text{ m}^3/\text{s}$; les débordements en rive gauche s'effectuent entre 250 et $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ($15 < T < 30 \text{ ans}$) à l'amont du pont ; la pénétrante est affectée par ces débordements car ils inondent par l'amont cette voie qui n'est sensible à l'aval que pour un débit de l'ordre de 450 à $500 \text{ m}^3/\text{s}$ ($70 < T < 85 \text{ ans}$) ;
- en rive droite, le Carré des Fusillés est inondé à partir de 300 à $400 \text{ m}^3/\text{s}$ ($30 < T < 50 \text{ ans}$), le reste étant hors d'eau pour une crue de $800 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fig. 3.3 : Vulnérabilité et fonctionnement hydrodynamique : carte extraite du Plan de Prévention des Risques prévisibles d'inondation de la commune de Nice

En résumé, sur la commune de Nice, les zones de risque fort correspondent aux zones d'aléa fort. En dehors du lit mineur, les principales zones niçoises de débordement en cas de crue centennale, concernent un petit secteur de 700 m² en amont des ponts du Lion et du Tigre (secteur A sur la photo aérienne), le carré des Fusillés (secteur B) de 1200 m² et une zone de 1300 m² (terrain de jeu) en amont de la passerelle de l'Ariane, rive droite (secteur C).

« Cependant, il est bon de garder en mémoire que la capacité du cours d'eau est ponctuellement proche de la crue centennale. De ce fait, une crue de période de retour légèrement supérieure à 100 ans pourrait provoquer des débordements dans les quartiers limitrophes au cours d'eau. »

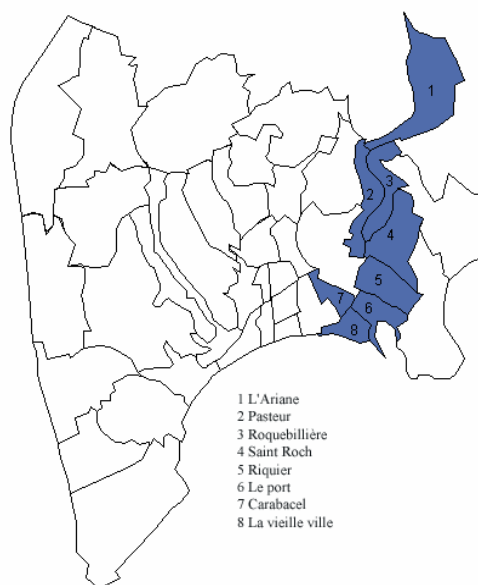
3.2.2. Des quartiers peuplés traversés par un axe de circulation majeur

3.2.2.1. Caractéristiques démographiques et socio-économiques des quartiers de Nice exposés au risque d'inondation.

Les quartiers de Nice traversés par le Paillon et représentés ci-contre, comptent parmi les plus peuplés et les plus fréquentés.

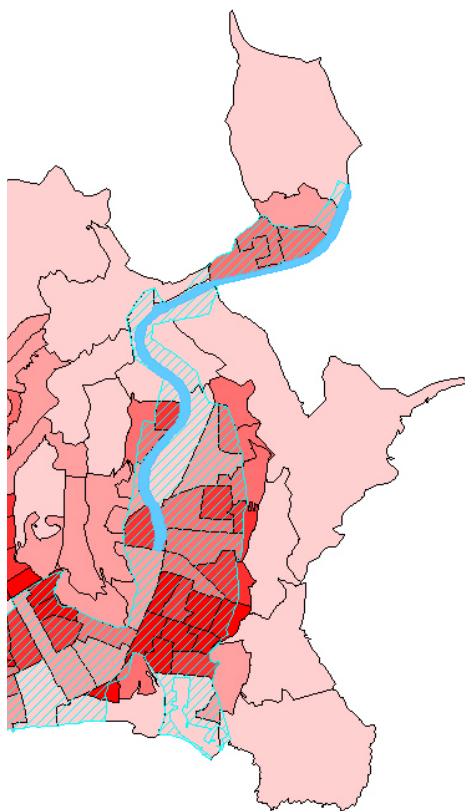
Ces 8 quartiers exposés aux menaces du Paillon couvrent 759 hectares, soit 10,5% de la surface de la commune de Nice et renferment 25% de la population niçoise.

La population y est plus jeune que la moyenne niçoise: 29,5% de moins de 24 ans contre 26,8%.



La carte des densités de population, à l'échelle des Iris 5000, extraite du SIG que nous avons réalisé (Fig. 3.4), souligne les fortes densités de cette zone urbaine (140 hab./ha contre 48 hab./ha pour la moyenne niçoise).

Une autre carte situe les principaux établissements à forte fréquentation de ces quartiers (centre commercial, lycée, écoles, gares de voyageurs et de marchandises, hôpitaux, casernes...). Ainsi, 4420 lycéens de Nice et des communes avoisinantes de la vallée du Paillon se rendent chaque jour dans les trois lycées de ces quartiers, auxquels s'ajoutent plus de 5000 collégiens et 8300 enfants fréquentant les maternelles et écoles primaires.



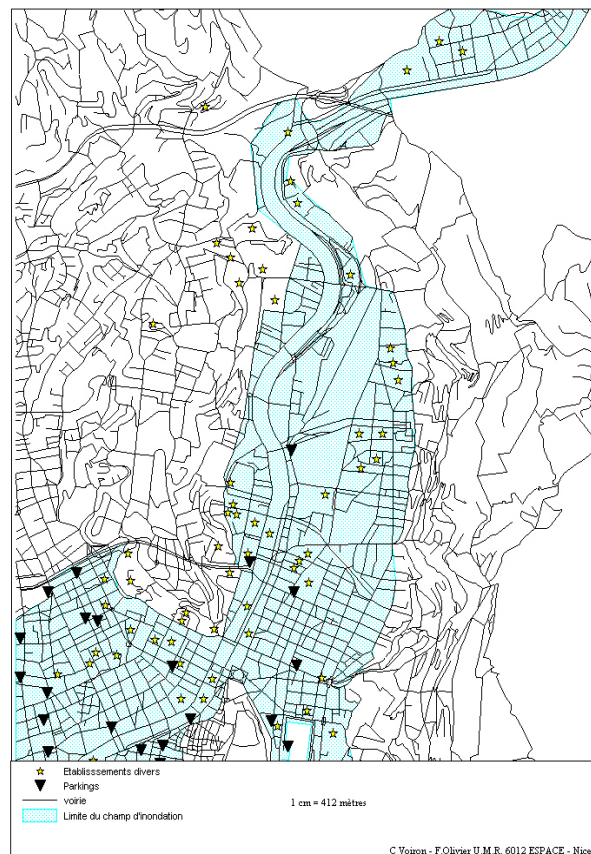
C.Voiron - F.Olivier U.M.R. 6012 ESPACE - Nice

Le bassin du Paillon :

- le Paillon
- Limite du champ d'inondation
- Limite des Iris

Densité de population à l'hectare
RGP 1999

- 247 - 466
- 187 - 247
- 116 - 187
- 69 - 116
- 6 - 69



C.Voiron - F.Olivier U.M.R. 6012 ESPACE - Nice

Fig. 3.4. Densités de population, parkings et établissements à forte fréquentation

3.2.2.2. Un axe à fort trafic, en cours d'aménagement

La vallée du Paillon n'est pas seulement une voie de circulation intra-urbaine, elle est surtout le seul axe de circulation desservant le bassin de population des Préalpes de Nice. Chaque jour, un flux important de navetteurs en provenance de Contes, Lucéram, l'Escarène, Blausasc, emprunte cette vallée pour aller travailler dans l'agglomération niçoise. La circulation moyenne y est de 60 000 véhicules par jour. De nombreux secteurs sont saturés aux heures de pointe, notamment la D 2204 entre Drap et la Pointe de Contes ainsi que la D 19, à la sortie de Saint-André.

Devant l'augmentation constante du trafic routier entre Nice et son arrière-pays, de nouvelles voies de circulation ont été réalisées depuis une quinzaine d'années dans le lit du Paillon et de nouveaux aménagements sont prévus dans les prochaines années, sur la commune de Nice ainsi que sur les communes situées plus à l'amont.

- Le premier tronçon de voie souterraine date de 1983. Cet axe de 700 m de long, situé sur la rive gauche, relie Barla au Palais des Expositions ; 15 000 véhicules en moyenne, l'empruntent chaque jour, 6 véhicules/10 sortent à Saint-Roch et 4/10 à Riquier.
- En novembre 1997, le tunnel Masséna-Paillon a été ouvert. Ce tunnel de près de 2 Km de long, prolonge le premier tronçon et permet de relier la Promenade des Anglais au quartier Saint Roch. La circulation se fait sur 2 voies de 3 m de large chacune, dans un seul sens. 20 000 véhicules circulent chaque jour sur cette nouvelle voie.
- Entre le pont V. Auriol à Nice et la commune de Cantaron, a été inaugurée en 1989, une pénétrante de 6,8 Km de long, à double sens, implantée en rive gauche (à l'aval) puis en rive droite (à l'amont) du fleuve.
- Le prolongement de la pénétrante du Paillon entre Cantaron et la Pointe de Contes a été décidé. Ce nouveau tronçon, de 2,7 Km, situé en rive droite, doit permettre de désengorger la D 2204 qui voit passer 21 000 véhicules/jour au-delà de la première section de la pénétrante. Le tronçon comprendra 2 Km de chaussée en remblai avec protection des berges. La section pourra être ultérieurement portée à 2 fois 2 voies. Un tunnel de 700 m est prévu au droit de la ZAC des Condamines à Drap, pour éviter les nuisances. Enfin un carrefour giratoire sera aménagé à chaque extrémité avec des ponts sur le Paillon.

Les projets :

- La ville de Nice, dans son « Projet urbain décennal 2010 » prévoit de percer un tunnel sous le Paillon, à la hauteur du complexe Jean-Bouin, destiné à relier la sortie de l'AUS (dite « voie rapide ») et la pénétrante du Paillon. Le futur plan de déplacement urbain a programmé la création de trémies sur la pénétrante du Paillon, à la hauteur de de la Place Garibaldi (réalisation prévue en 2001), de la rue Maraldi (en 2002), et de la Place de la Brigue (en 2003).
- Il est également prévu de prolonger vers l'amont la couverture du Paillon.

3.2.3. Les difficultés de circulation et d'évacuation : risques majeurs en cas de crue du Paillon

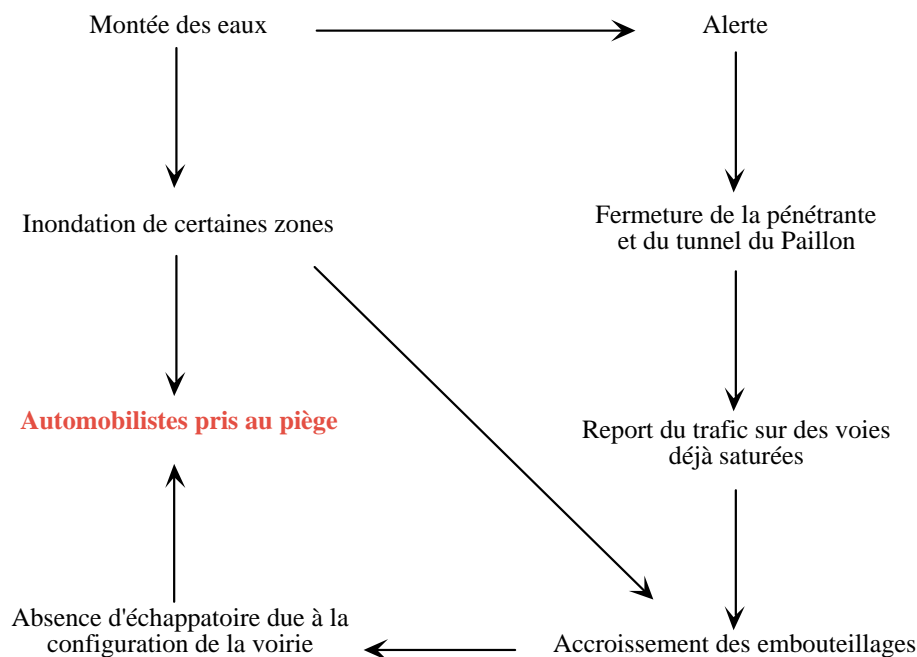
En cas d'alerte, 9 stations de surveillance sont réparties le long du cours d'eau et de ses affluents (Palais des Expositions, La Trinité, la Condamine, Contes, Coaraze,

Tourrette-Levens au Plan de Revel, Moulin du Paillon, Lucéram et au Mont Ongrand, au dessus de Peille) auxquelles devraient s'ajouter deux nouvelles stations situées au dessus de l'Escarène et de la Condamine. Chacune de ces stations est équipée d'un pluviomètre, d'une sonde de température de d'hygrométrie ainsi que d'une sonde de niveau ultrasonique. Un ordinateur central situé à Nice interroge les stations toutes les six minutes, valide les données et déclenche le cas échéant une alerte. Une pré-alerte est donnée lorsque le coefficient d'absorption du sol diminue et que l'eau ruisselle dans le lit du fleuve. L'alarme est déclenchée quand les hauteurs d'eau atteignent 1,16 m à la Trinité et 1,80 m au Palais des Expositions. Le tunnel du Paillon et la voie sur berge sont alors interdits à la circulation. Trois portes métalliques descendent automatiquement pour fermer l'accès à la voie souterraine, en cas de menace de crue. Le rôle de la porte située à l'aval est aussi de canaliser les eaux du fleuve vers le boyau qui débouche sur la mer. Depuis la mise en place de ce système de surveillance, seules des pré-alertes ont été déclenchées.

Ainsi, le Paillon dispose d'un système d'alerte sophistiqué, que le Var ne possède pas encore. L'une des tâches du Syndicat Intercommunal des Paillons réunissant 9 communes et qui a été créé en hiver 1996, est de concevoir et de mettre en place un plan d'alerte commun pour agir tant au niveau des établissements les plus sensibles qu'au niveau des individus. L'alerte donne un délai d'une heure avant la montée de l'eau, une précieuse heure « pour intervenir et prendre les mesures qu'impose la situation ».

Or, le point crucial en phase d'inondation comme en phase d'alerte, concerne la circulation dans la vallée et dans les quartiers de Nice menacés par le fleuve. Plus précisément, les délais d'évacuation des périmètres inondables et les conditions d'accessibilité des secours, dans ces zones d'intense trafic sujets à de fréquents engorgements, sont source d'inquiétude, comme l'atteste le scénario ci-dessous.

Scénario :



Cet aspect de la question des risques d'inondation en milieu urbain, est bien à l'heure actuelle, l'un des points les plus inquiétants, l'un des moins étudiés et de ce fait, l'un des moins maîtrisés.

Nous avons donc souhaité axer l'étude de la vulnérabilité des centres urbains face au risque d'inondation sur les questions touchant aux conditions de circulation et aux mesures à prendre pour prévenir les engorgements.

3.2.4. Systémogénèse de la paralysie des aires urbaines en phase d'alerte d'inondation

La paralysie de la circulation découle d'un enchaînement de faits, les uns relevant du fonctionnement habituel d'une grande ville et les autres, des mesures exceptionnelles prises en phase d'alerte. La figure 3.5 représente les éléments et les interactions qui concourent au système de blocage du réseau de circulation intra-urbain :

- Un axe de circulation majeur saturé.
- De nombreux « enjeux » humains et matériels disséminés dans la zone inondable.
- La systémogénèse débute avec les mesures prises en phase d'alerte. Les fermetures du tunnel et de la pénétrante du Paillon, vont entraîner la mise en place de déviations et un report du trafic sur des artères avec un congestionnement de la circulation prévisible. Ce dernier est amplifié par l'augmentation soudaine du trafic résultant des consignes données aux propriétaires de véhicules (Annexe 1 : consignes en cas d'inondation) et des mesures d'évacuation des établissements publics, qu'elles soient organisées par les secours ou le fait des particuliers.
- Le comportement des automobilistes, en phase d'alerte intervient à son tour. Les niçois et les habitants des zones avoisinantes qui transitent chaque jour par la vallée du Paillon, ne mesurent pas le danger d'une inondation. Ce dernier est sous-estimé, car, ici, contrairement à d'autres zones urbaines méditerranéennes (Gênes, Nîmes), les débordements récents du fleuve n'ont pas engendré de catastrophe. De plus, toute fermeture préventive des voies du Paillon est, aux heures de forte circulation, très mal ressentie par les automobilistes. Aussi, comme l'atteste l'article cité en Annexe 2, les mesures de précaution prises en phase d'alerte, sont-elles très critiquées et ont-elles donné lieu à des tensions avec les forces de l'ordre, en de nombreuses occasions. Si l'inondation devient effective et si l'alerte se généralise, le non respect des consignes de sécurité et autres comportements imprévisibles, risquent de provoquer une entrave supplémentaire à la circulation, aux abords de la zone inondable.

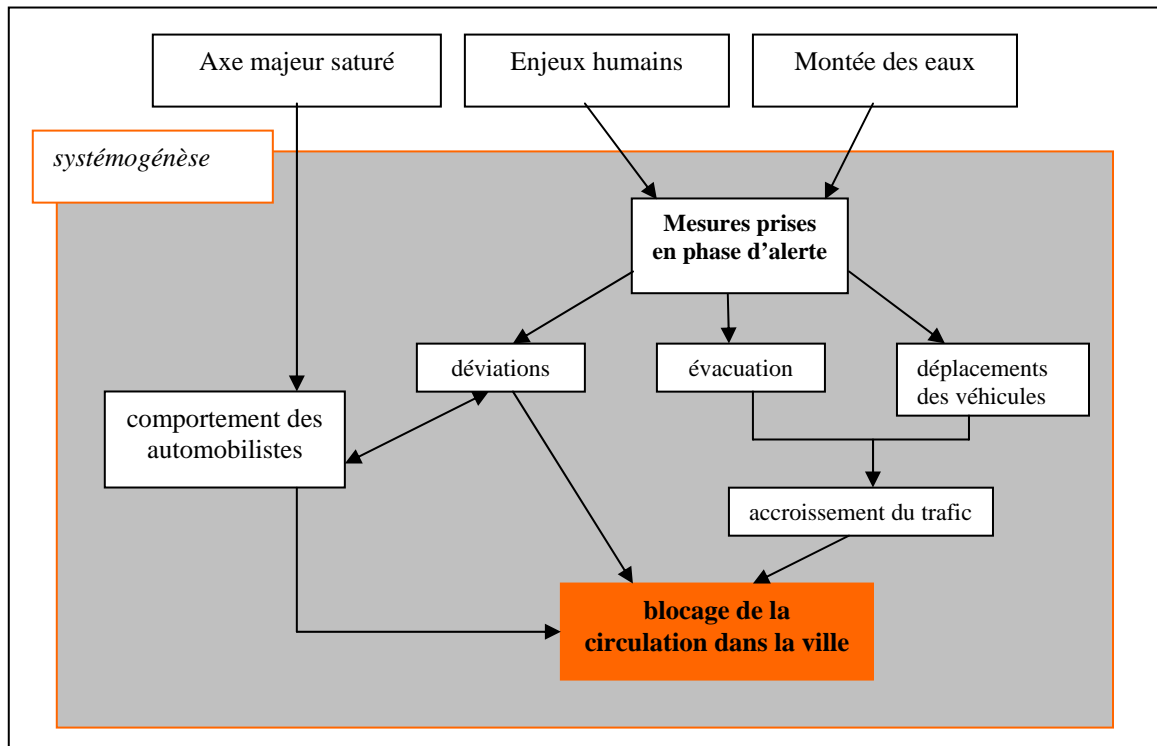


Fig. 3.5 : Systémogénèse du blocage de la circulation aux abords de la zone inondable

3.2.5. Méthodologie employée dans l'étude la vulnérabilité urbaine

Le périmètre d'étude correspond au champ maximum d'inondation du Paillon, dans Nice, délimité par J. de Saint-Seine.

L'étude de la vulnérabilité des quartiers de Nice menacés par le Paillon est menée en trois temps :

- Quantification de la vulnérabilité des Iris 5000 ;
- Quantification de la vulnérabilité de la voirie ;
- Repérage des zones à enjeux statiques et à enjeux dynamiques.

en prenant en compte :

- les caractéristiques intrinsèques de chaque lieu :
 - l'altitude,
 - la distance au fleuve,
 - la configuration de la voirie et le plan de circulation.
- l'occupation de l'espace :
 - la densité de la population à l'échelle des Iris,
 - les établissements fréquentés en fonction de l'heure, du jour et des périodes de l'année (centres commerciaux, établissements scolaires, de soin, gares routières et ferroviaires).
 - les parkings souterrains,
- les relations du lieu avec les autres zones urbaines et les communes péri-urbaines voisines :
 - les flux de véhicules en moyenne journalière, aux heures de pointe ...
- La place stratégique du lieu étudié, dans la ville :

- l'importance stratégique du lieu en phases d'alerte et de débordements : localisation du PC de crise, des centraux électriques, des centres de secours, des services des urgences, des casernes...
- les chemins obligés conduisant à chacun d'eux...
- l'analyse particulière des carrefours (localisation vis à vis des secteurs de débordements prévisibles, flux de circulation les caractérisant, existence d'échappatoire, situation par rapport aux voies de circulation qui seront fermées et par rapport aux enjeux humains à évacuer, flux estimés des reports de trafic ...)

3.2.5.1. Quantification de la vulnérabilité des Iris

La vulnérabilité liée à la densité de population de l'Iris et à la présence d'établissements à forte fréquentation a été calculée en attribuant la pondération suivante :

Densités de population (population en 1999/ha) réparties en trois classes :

- de 1 à 102 habitants/ha : valeur 2
- de 102 à 160 habitants/ha : valeur 3
- plus de 160 habitants/ha : valeur 4

Prise en compte de la présence d'établissements à forte fréquentation :

- valeur de la densité inchangée s'il n'y a pas d'établissements à forte fréquentation dans l'Iris,
- valeur de la densité multipliée par 2 s'il y a un établissement,
- valeur de la densité multipliée par 3 s'il y a entre 2 et 4 établissements.

Codification des valeurs résultantes (Fig. 3.6):

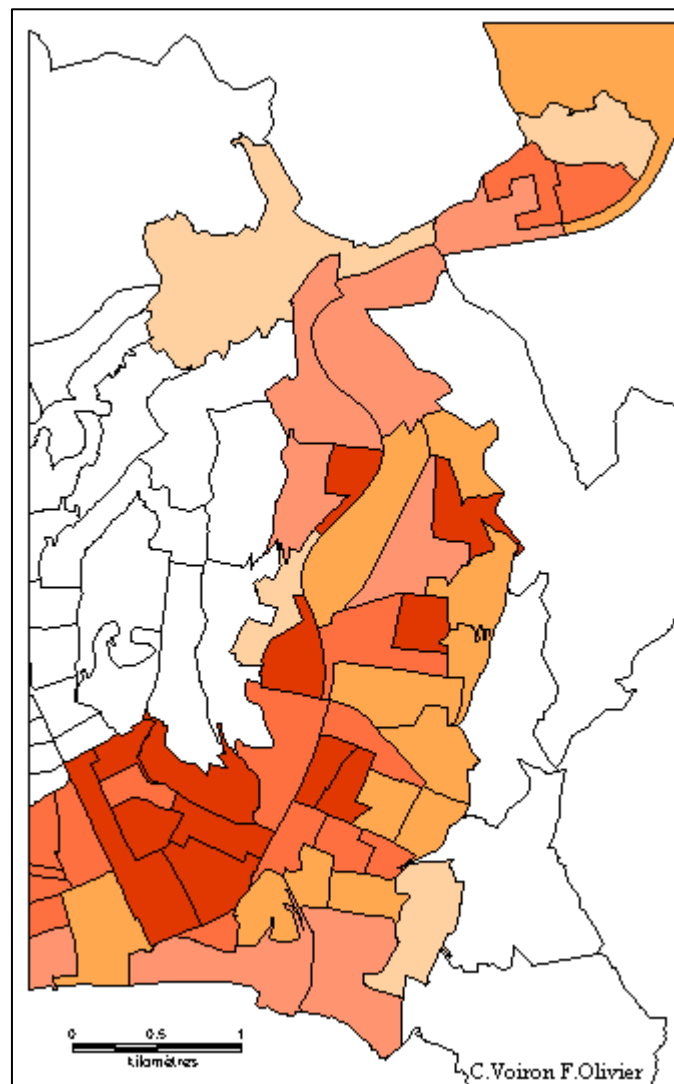
Valeur 2 : niveau 1 de vulnérabilité

Valeurs 3 et 4 : niveau 2 de vulnérabilité

Valeurs 5 et 6 : niveau 3 de vulnérabilité

Valeurs 7 et 8 : niveau 4 de vulnérabilité

Valeur supérieure à 8 : niveau 5 de vulnérabilité



Vulnérabilité des Iris liée à la population résidente
et aux établissements majeurs fréquentés

- Niveau 5
- Niveau 4
- Niveau 3
- Niveau 2
- Niveau 1
- Hors zone inondable

Fig.3.6 : Vulnérabilité des quartiers Est de Nice

- Analyse des flux de circulation dans les artères et dans les carrefours aux heures de pointe.

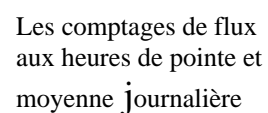


Fig. 3.7 : Flux de circulation dans les quartiers Est de Nice

- Etude de la morphologie de la voirie :
 - le sens de la voirie dans le plan de circulation,
 - la convergence de la voie vers la zone inondable,
 - l'existence d'une échappatoire au secteur inondé.

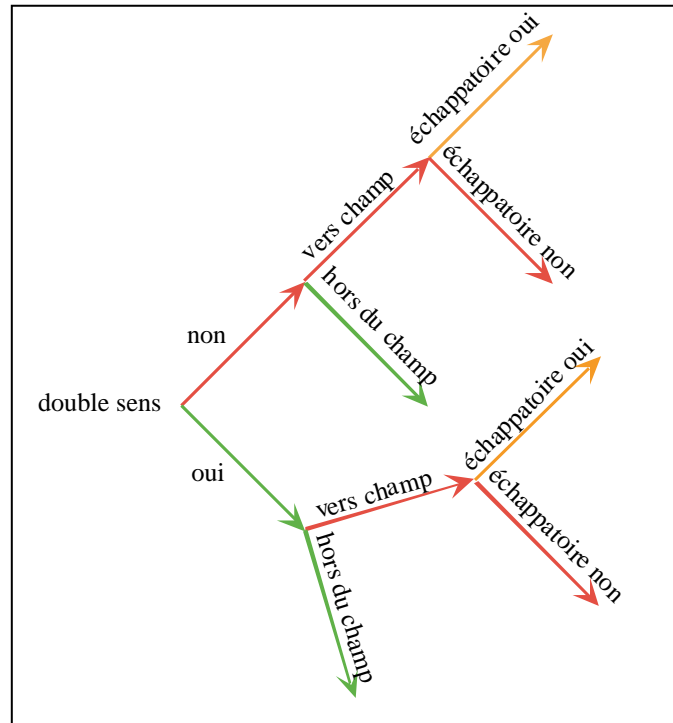


Fig. 3.8 : Configurations de la voirie dans le champ inondable

- Typologie des voies en fonction de ces critères.

Les valeurs attribuées sont d'autant plus élevées que la configuration de la voie et sa localisation vis à vis du champ d'inondation accentuent les risques d'engorgement de la circulation :

Double sens (Non)-hors champ (Oui) = 1

Double sens (N)-hors champ (N) –échappatoire directe (O) = 2

Double sens (N)-hors champ (N) –échappatoire directe (N)-échappatoire proche (O) = 6

Double sens (N)-hors champ (N) –échappatoire directe (N)-échappatoire proche (N) = 12

Double sens (O)-hors champ (Oui) = 2

Double sens (O)-hors champ (N) –échappatoire directe (O) = 4

Double sens (O)-hors champ (N) –échappatoire directe (N)-échappatoire proche (N) = 12

- Vulnérabilité des artères, liée aux caractéristiques de la voirie et aux flux de circulation (Fig. 3.9)

Addition des codes de valeur de :

- la morphologie de la voirie,
- du trafic des artères aux heures de pointe,
- du trafic des carrefours.

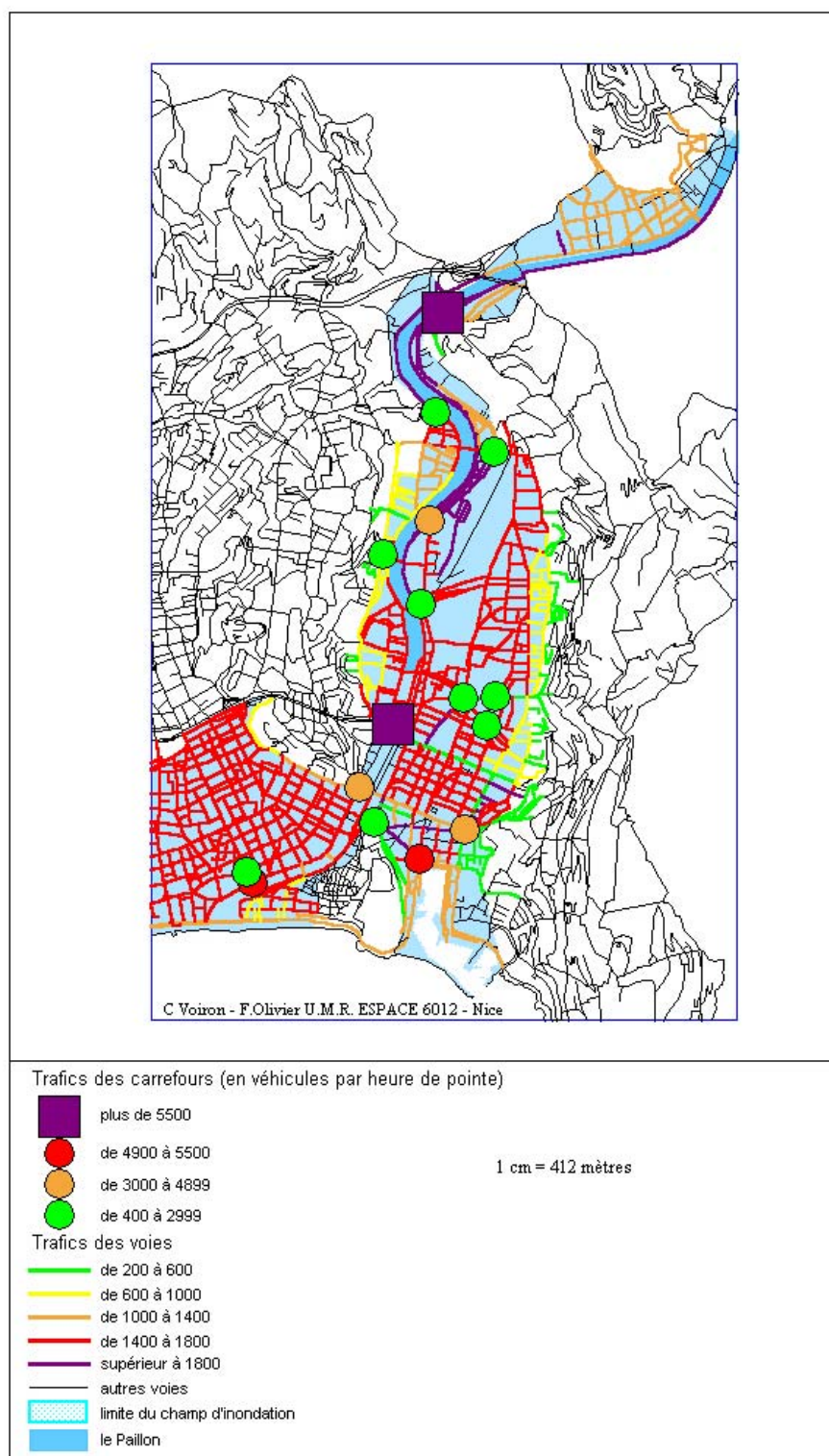


Fig. 3.9 : Vulnérabilité des voies et des carrefours

- Vulnérabilité des IRIS, liée aux caractéristiques de la voirie et aux flux de circulation (Fig. 3.10)

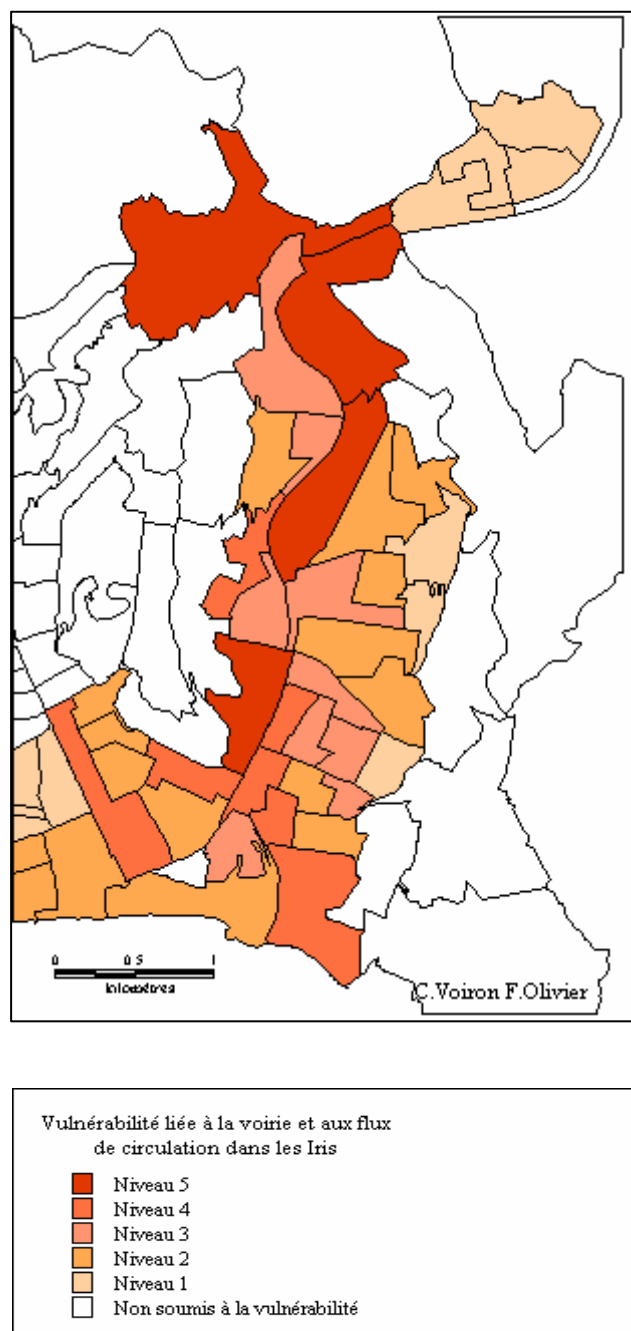


Fig. 3.10 :Vulnérabilité dépendant des caractéristiques de la voirie et des flux de circulation

- Codification des valeurs-résultats (Fig. 3.11)

Valeurs 6 à 9 : niveau 1 de vulnérabilité

Valeurs 10 à 14 : niveau 2 de vulnérabilité

Valeurs 15 à 18 : niveau 3 de vulnérabilité
 Valeurs 19 à 24 : niveau 3 de vulnérabilité
 Valeur supérieure à 25 : niveau 5 de vulnérabilité

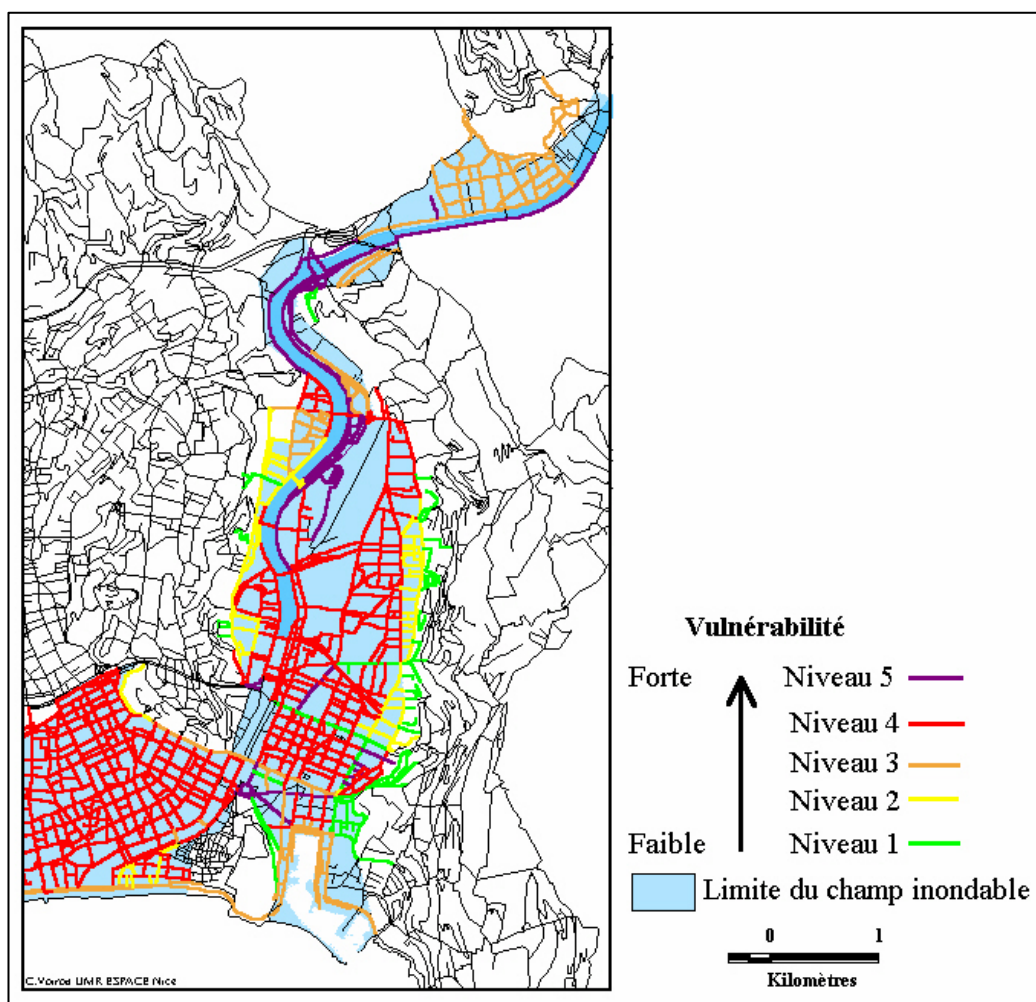


Fig. 3.11 : Niveau de vulnérabilité globale de la voirie

3.2.5.3. Repérage des espaces à enjeux dynamiques dans les quartiers Est de Nice, menacés par le Paillon

Cette détection s'effectue en :

- recherchant les artères connectées aux voies barrées vers lesquelles le trafic sera dévié ;
- examinant leur niveau de vulnérabilité ;
- intersectant ces artères à enjeux dynamiques, avec les enjeux statiques et les chemins menant à eux.

Les voies qui résultent de cette intersection sont celles qui, en phase d'alerte comme en temps de crise, doivent faire l'objet d'une attention particulière, afin de veiller à la fluidité du trafic indispensable au bon déroulement des mesures d'évacuation ainsi qu'à l'acheminement des

secours. De plus, leur repérage, peut amener à réexaminer le plan de circulation en vigueur et à le modifier, à titre préventif.

Bibliographie

BLAIKIE P., CANNON T., DAVIS I., WISNER B. (1994), *At risk : natural hazards, people's vulnerability, and disasters*, London, Routledge, 284 p.

BLANCHER Ph., (1995), "Risque et densité", *Les Annales de la Recherche Urbaine*, n° 67, pp.109-116

COMBE P-M., (1999), « Economie des inondations : vers la maîtrise négociée du risque », *Revue d'Economie Régionale et Urbaine* n°5, pp.961-998

PROVITOLLO D., (2001), *Risque urbain, catastrophes et villes méditerranéennes*, thèse de doctorat de géographie, Nice, 365 p.

Annexe 1

Les consignes données dans *Le dossier d'information de la Mairie de Nice sur les risques naturels et technologiques*

(sont soulignées les consignes nécessitant des déplacements dans la ville)

Ecouter RADIO France COTE D'AZUR (98.8 ou 100.4 Mhz)

- Comment est donnée l'alerte ?

Des panneaux d'interdiction de stationner sont installés sur les zones inondables.

L'alerte est donnée avant que l'inondation ne soit effective.

Les populations dans les zones à fortes probabilités d'inondation sont informées de l'alerte ou par visite à domicile des services de sécurité ou par des véhicules équipés de haut parleur.

Le plan d'annonce des crues permet à la Mairie de s'informer directement auprès de la Direction Départementale de l'Équipement (D.D.E.) par l'intermédiaire du Centre Opérationnel Départemental d'Incendie et de Secours (C.O.D.I.S).

- Le système d'annonce des risques de crues du Paillon permet d'informer les autorités en amont

Les quartiers Est de Nice sont traversés par le Paillon, rivière côtière des Alpes-Maritimes, à régime typiquement torrentiel, et couverte depuis la mer sur une longueur de plus de 2 km. Afin d'améliorer les conditions de circulation, sur les axes routiers longeant ce cours d'eau (accès à l'échangeur de l'autoroute A8, « La Provençale ») et dans la perspective à terme de la création de la pénétrante Nice-Le Paillon, la Ville a décidé d'utiliser une arche de l'ouvrage de couverture pour créer une voie routière. Un projet réalisable en raison des longues périodes de sécheresse et de faible fréquence de crues du Paillon, dont le transit sous la couverture nécessite l'utilisation de toutes les arches.

Afin d'éviter une inondation de l'arche routière lors de la montée moyenne des eaux, un déversoir de protection du tunnel, mis au point par étude hydraulique sur modèle réduit, a été construit en amont de l'ouvrage. Pour les grandes crues, aux montées extrêmement rapides des eaux, il fallait mettre en place un dispositif visant à assurer la sécurité des usagers empruntant l'ouvrage routier.

- Que font les secours ?

Lorsque l'alerte est donnée, c'est à dire avant que l'inondation ne soit effective, les sapeurs pompiers mettent en place un poste de commandement mobile et préparent les unités de secours.

- les unités de reconnaissance
- les unités de sauvetage
- les unités de pompage
- les unités de plongeurs.

Des mesures de sauvegarde sont mises en place :

- déviations de la circulation
- installation de batardeaux aux portes de la ville donnant sur le Var, pour empêcher la pénétration des eaux.

Si la situation est particulièrement grave, le Préfet peut déclencher le plan ORSEC, le Plan Rouge, le Plan d'Hébergement et le Maire active la cellule Municipale.

- Les forces de police se mettent à la disposition du Directeur des Secours ainsi que les Services de signalisation et de barrières qui sont maîtres d'œuvre pour la mise en place du dispositif de déviation de la circulation routière.
- La Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales, en liaison avec le Service Communal d'Hygiène et de Santé surveille la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine et assure les vaccinations éventuelles.
- Les missions du Centre Communal d'Action Sociale sont les suivantes :
 - avant inondation :
Informer les usagers de la fermeture ou de l'évacuation des structures d'accueil sociales et socio-éducatives menacées dans la ville : crèches, foyers, centres sociaux, maisons paisibles, foyers d'hébergement.
 - dans les autres cas :
veiller à l'application des mesures globales, aux équipements sociaux et leurs publics spécifiques.

- Que doit faire la population ?

Respecter la réglementation de circulation et de stationnement.

Lorsque le risque d'inondation du Var et du Paillon se précise, il ne faut pas attendre que l'information vous parvienne directement, il faut aller au devant d'elle.

- 1) Ecouter RADIO France COTE D'AZUR (98.8 ou 100.4 Mhz)
- 2) Couper l'électricité et le gaz, laisser le téléphone branché
- 3) Rester dans les étages supérieurs des habitations
- 4) Ne pas laisser les denrées périssables dans les zones inférieures des bâtiments
- 5) Ne pas consommer l'eau de la distribution publique ou des puits particuliers sans l'avis des services compétents
- 6) Si la montée des eaux est très importante, l'évacuation peut être nécessaire sans attendre le dernier moment
- 7) Se conformer aux directives des services techniques et des pompiers y compris en cas de mesure d'évacuation
- 8) Contrarier la pénétration de l'eau en réalisant des seuils et en obstruant les orifices.

Les consignes du Service Départemental d'Incendie et de Secours des A-M
délivrées dans Nice-Matin du 20 novembre 2000

- Précautions à prendre en cas de montées des eaux prévisibles
- En zone inondable, ne pas occuper les points bas (sous-sol, garage).
- Débarasser les lieux et surélever les meubles et autres équipements.
- Evacuer les véhicules et les positionner en point haut (par exemple, au sommet d'une côte)...
- Les inondations imprévisibles
- Evacuer les lieux de suite, dès la montée des eaux et ne surtout pas chercher à lutter contre les inondations.
- Ne pas hésiter à appeler les secours, mais être « honnête », pas de surestimation du niveau des eaux.
Les secours doivent toujours opérer une reconnaissance sur le terrain avant de délimiter les interventions prioritaires...

« Le piège du Paillon »

Extrait de Nice-Matin du 25 novembre 2000

Encore une fois, les militaires d'automobilistes et de camionneurs qui empruntent chaque jour la route des vallées du Paillon ont été hier matin les victimes d'un gigantesque embouteillage.

Sur le coup de 8 heures, il fallait compter pratiquement deux heures pour rejoindre Contes à Nice par la vallée, et presque autant en passant par Châteauneuf, Tourette-Levens et Castagniers pour rejoindre l'ouest de la ville ! Arrivée au travail en retard, énervement, têtes froissées.

Et cette fois, pas d'éboulement au Pont de Peille mais un blocage dû à la fermeture de toutes les voies sur berge du Paillon.

Les usagers comprennent bien sûr que des précautions extrêmes soient prises dans la partie niçoise de la pénétrante où l'invasion des tun-

nels par les flots serait dramatique.

Ils comprennent moins qu'au même moment, la partie aérienne entre Drap et l'Ariane soit également interdite alors qu'au plus fort des intempéries, le Paillon était encore à plus de deux mètres sous la route !

L'ouverture de ce seul tronçon jusqu'à l'Ariane aurait permis sans danger d'éviter l'engorgement de la vallée.

Car envoyer un tel flot de véhicules traverser Drap et La Trinité ne pouvait que provoquer la thrombose.

Que dire enfin de l'absence de tout képi à l'horizon pour tenter de fluidifier ce trafic, avec des dizaines de 35 tonnes qui avaient bien du mal à se croiser dans le goulet de La Trinité...

Christian PERRIN.

4. Evaluation par analyse multicritère de la vulnérabilité urbaine et périurbaine en cas d'inondation

Didier Graillot

4.1 Rappel des Objectifs et de la méthodologie

4.1.1 Les objectifs

Il s'agit d'identifier et de caractériser la vulnérabilité des zones urbaines en cas d'inondations pour en limiter les effets à partir d'une analyse multicritère détaillée de cette vulnérabilité. Cette approche est complémentaire de celle développée par l'IGA de Grenoble qui a permis d'aboutir à la production de cartes de risques à partir d'indices de vulnérabilité établis selon l'occupation des sols (vulnérabilité agricole, vulnérabilité urbano-industrielle).

Le site d'application choisi est celui de la basse vallée du Var à l'ouest de Nice. Le choix de cet emplacement est naturel puisque ce travail s'intègre dans le cadre de l'étude de Maryse GUIGO de l'IGA [GUIGO. M et BAILLY. L, 1999] sur les risques d'inondation dans les agglomérations urbaines méditerranéennes. Une recherche très poussée a été réalisée sur le secteur urbain de Nice qui "permet d'acquérir une connaissance diachronique de l'évolution conjointe de la vulnérabilité et de l'aléa en fonctions des dynamiques urbaines" à l'aide de S.I.G.

Le secteur étudié se situe donc depuis l'embouchure du Var jusqu'à environ 4 kilomètres en amont. La rive gauche concerne la commune de Nice et celle de Saint-Laurent du Var pour la rive droite. A cet endroit, la rivière s'écoule dans la plaine alluviale occupée par des chenaux divaguant entre des bancs. Cette plaine est bordée de part et d'autre de collines topographiquement marquées. Ces dernières années de nombreuses constructions et activités ont envahi le lit majeur du Var. Les enjeux (importance foncière, dynamique économique et urbanisation intensive) font de cette zone un secteur pour lequel la vulnérabilité aux inondations ne fait que s'accroître au fil du temps [DAGORNE. A, 1998]. La crue la plus spectaculaire est celle survenue le 5 novembre 1994, elle a provoqué l'inondation en rive gauche, de la partie nord de l'aéroport, du Centre Départemental Administratif, du Marché d'Intérêt National et du quartier de l'Arénas.

Rappel des débits caractéristiques du Var à Nice (SOGREAH & DAGORNE 1998)

	Débit du Var à Nice en m ³ /s
Eté (moyenne mensuelles)	6
Octobre (moyenne mensuelle)	70
Mai (moyenne mensuelle)	100
Crue décennale (étude SOGREAH)	2045
Crue centennale (étude SOGREAH)	3512

4.1.2 Critères et sous-critères de vulnérabilité

Les critères pouvant évaluer cette vulnérabilité sont nombreux, complexes et très homogènes. La première étape consiste à construire un modèle pertinent de critères et de sous-critères de vulnérabilité. Dans le cas présent, le problème est d'apprécier par le biais d'une valeur numérique, le degré de vulnérabilité en cas d'inondation d'une parcelle de terrain.

Ces critères ont été identifiés à partir du **mode d'occupation des sols** en nous aidant du zonage des P.O.S. Nous avons donc différencié l'habitat (centre ville, mixte, collective, pavillonnaire et isolé), le secteur industriel, le secteur commercial (grande surface et commerces de proximité), les infrastructures de loisirs (d'intérieures, d'extérieures et camping) et le secteur agricole (friches, serres et agriculture à ciel ouvert). Il nous est apparu important d'ajouter certains autres paramètres caractérisés par une vulnérabilité remarquable : les établissements scolaires et maisons de retraite, la circulation automobile et piétonne, les gares, les réseaux de communications, les parkings ("aériens" et souterrains), les hôpitaux et cliniques, les centres de secours (casernes de pompiers, commissariats et gendarmeries), et les bâtiments administratifs. Le choix de cette classification nous a paru pertinente car elle tient compte de l'usage du sol, de la densité du bâti et de la population, de l'activité et par conséquent de la valeur de l'occupation du sol en terme d'enjeux économiques et humains.

Certains autres critères auraient été intéressants à insérer au sein de l'arborescence comme le coefficient d'imperméabilisation (Surface imperméable/Surface totale) ou le coefficient de ruissellement (il caractérise la capacité d'une surface réceptrice des eaux pluviales à les faire ruisseler mais le manque de données sur ce critère ne l'a pas permis.

mode d'occupation des sols (zonage des P.O.S.)



CRITERES et SOUS-CRITERES

- habitat (centre ville, collectif, pavillonnaire et isolé, mixte)
- secteur industriel
- secteur commercial (grande surface et commerces de proximité)
- infrastructures de loisirs (camping,....)
- secteur agricole (friches, serres,.....)

- établissements scolaires, maisons de retraite

- circulation automobile et piétonne,
- gares, réseaux de communications, parkings

- hôpitaux et cliniques
- centres de secours
(casernes de pompiers, commissariats, gendarmeries)

- bâtiments administratifs.
- usage du sol, densité du bâti et de la population
- valeur de l'occupation du sol en terme d'enjeux économiques et humains

- coefficient d'imperméabilisation ?
- distance à la rivière ?
- hauteurs d'eau

.....environ 300 critères et sous-critères

données de la CCI de Nice sur les entreprises de plus de 10 salariés



Construction d'une arborescence

Importance relative des poids de chaque critère frère (échelle visuelle)

Calcul de la moyenne des préférences.

4.1.3 Principes de l'Analyse Multicritère

La Méthode de Hiérarchie Multicritère (MHM) développée par T. SAATY est une méthode d'analyse multicritère, destinée à aider le décideur, public ou privé, à affiner son processus de décision en examinant la cohérence et la logique de ses préférences. Elle se révèle ainsi pertinente pour allouer des ressources selon des priorités, pour planifier des projets, etc... Elle peut donc être très intéressante dans la quantification et la hiérarchisation de critères et de sous-critères caractérisant la vulnérabilité aux inondations en milieu urbain.

Il s'agit :

- de définir le problème et de préciser la solution désirée : le problème est de caractériser la vulnérabilité urbaine aux inondations en élaborant tous les critères qui définissent cette vulnérabilité, puis en les hiérarchisant dans un système arborescent.
- de structurer la hiérarchie obtenue afin de définir les critères de même niveau en commençant par les niveaux les plus proches du « sommet » jusqu'au niveau sur lequel il est possible d'intervenir pour résoudre le problème.

La MHM propose ainsi une démarche claire et simple à la compréhension et à la structuration des critères et sous-critères. Elle se propose de classer différents produits, projets, scénarios, etc., selon les notes obtenues. A partir de cette méthode, il s'agit d'évaluer des zones géographiques suivant leur vulnérabilité aux inondations.

Construction d'une matrice de comparaisons binaires qui définit les poids des critères les uns par rapport aux autres sur un même niveau

Analyser, comparer, pour décider et agir.

....n'impose pas de solutions

.....compromis dans des choix souvent conflictuels.

Méthode de Hiérarchie Multicritère (MHM)

T. Saaty

ELECTRE [Maystre, 1999].

*Trier, organiser et hiérarchiser les critères et sous-critères

caractérisant la vulnérabilité aux inondations en milieu urbain.

*Préférence de critères les uns par rapport aux autres

*Niveaux de critères (priorités)

*Arborescence définissant différents niveaux de critères

Interprétation d'une arborescence pondérée dont chaque paramètre est "*identifié en intensité (poids relatif) et en relation*"

* relations horizontales entre critères : dépendance par rapport au but

* relations verticales : importance relative (poids)

4.2 Fonctionnement de la MHM

Le logiciel DESCRIPTOR[®] est conçu pour l'application de la Méthode de Hiérarchie Multicritère. En effet, si la solution à laquelle on parvient à l'aide de la MHM ne convient pas au décideur ou que l'indice de cohérence n'est pas satisfaisant, il est alors possible de redéfinir et de restructurer la hiérarchie ou d'affiner les appréciations. Son fonctionnement s'articule autour de l'interprétation d'une arborescence pondérée dont chaque paramètre est défini, et identifié en intensité et relation.

DESCRIPTOR[®] se compose de deux phases principales :

- La première permet de concevoir l'application, c'est à dire d'élaborer la hiérarchie des critères choisis au sein d'une arborescence (*Analyse*) puis d'établir les pondérations des critères associés (*Expertise*).
- La seconde permet de "*dialoguer avec l'utilisateur final et/ou une Base de données afin d'obtenir, dans le contexte prévu, les résultats recherchés*". Suivant les différents scénarios, des choix vont s'effectuer en fonction des réponses élaborées en bout d'arborescence. Les réponses sont propres au scénario envisagé et vont déterminer la "note" de celui-ci. Les notes peuvent alors être comparées.

Il est intéressant de noter que de nombreux organismes utilisent déjà le logiciel DESCRIPTOR[®] dont EDF.

4.2.1 Elaboration de l'arborescence de critères

Toute situation étudiée se décrit sous la forme "*d'une arborescence hiérarchique dont chaque paramètre est identifiée en nature (libellé, définition,...) et intensité (poids relatif)*". La représentation de l'arborescence s'établit sous la forme de couples père-fils :

Critère père Y \longrightarrow x critères fils (a, b, c,...)

L'arborescence ainsi réalisée permet de définir des relations horizontales entre critères, qui expriment une dépendance par rapport au but et des relations verticales qui expriment l'importance relative (le poids) accordée par les décideurs ou experts à un critère donné par rapport à tous les autres critères fils de même père ("*relation d'interdépendance*"). La somme des poids relatifs de tous les critères fils d'un même critère père doit être égale à 1, quel que soit le mode d'affectation du poids retenu. La modularité du logiciel permet de changer la valeur des poids des critères très facilement et de procéder automatiquement à des analyses de sensibilité.

Dans notre cas, il s'agit d'évaluer par l'intermédiaire du même type d'arborescence, la vulnérabilité urbaine aux inondations à partir des critères retenus. Chacun des critères pères est alors défini par des critères fils. Soient ceux-ci sont communs à la quasi totalité des critères pères (exemple : paramètres inondations, zones inondables, quantité ou densité, proximité des secours...), soient ils leurs sont propres (exemple : y a-t-il des patients au rez-de-chaussée pour le critère père "hôpitaux et cliniques" ou paramètres financiers et paramètres produits pour le critère père "industrie"). En bout d'arborescence (derniers niveaux), se trouvent les réponses envisagées qui sont propres au site étudié. Il est possible d'affecter la valeur « inconnu » en bout d'arborescence au cas où l'un des critères pères soit absent du site étudié ou que les données en

notre possession ne nous permettent pas de savoir si un des critères pères est représentatif de cette même parcelle de terrain étudiée.

L'arborescence finale compte près de **800 critères**. Tous sont **définis en annexe** (cf. annexe n°1). **L'arborescence finale** de part sa longueur est aussi **représentée en annexe** (cf. annexe n°2).

4.2.2 Evaluation des pondérations.

L'arborescence étant construite, il nous faut alors chercher à évaluer l'importance de chaque critère fils issue du même critère père malgré parfois la forte disparité de leur nature. Pour cela la méthode consiste à comparer deux à deux les paramètres d'un même niveau issue du même critère père au moyen d'une échelle visuelle exprimant l'importance relative que nous attribuons à tel ou tel critère d'évaluation. Dans notre cas, nous avons évalué nous-mêmes les pondérations de chaque critère, par l'intermédiaire de trois personnes neutres (c'est à dire non scientifiques) au problème posé. La question qui leur était posée était la suivante : "De cette suite de critères frères, classez les de façon à avoir en premier celui qui selon vous augmente le plus la vulnérabilité en cas d'inondation d'une zone géographique". Le calcul des poids de chaque critère frère (issue du même père) s'effectue alors en réalisant la moyenne des préférences. L'intensité des appréciations est restituée au logiciel avec le plus d'objectivité possible qui à son tour l'exprime sous la forme d'une échelle-ratio comprise entre 0 et 1. Corrélativement, le système fournit un indice de cohérence destiné à apprécier la stabilité du jugement : une valeur supérieure à 0.1 doit inciter le répondant à reconsidérer ses préférences. La somme des pondérations des critères frères est égale à 1. Les poids des critères de l'arborescence établie sont notés en dessous de chaque critère .

Il faut aussi préciser que les poids attribués à chaque critère peuvent être modifiés très facilement. Tout autre utilisateur du système, n'estimant pas être d'accord avec les pondérations proposées, a la possibilité de changer ces poids très commodément.

- élaborer tous les critères qui définissent cette vulnérabilité urbaine aux inondations
- Structurer la hiérarchie afin de définir les critères de même niveau
- Définition des poids des critères (matrice de comparaisons binaires)
- Calcul d'un "ratio de cohérence " (<10%)
Cohérence moyenne , Indice de cohérence
$$\text{Ratio de cohérence} = (\text{indice de cohérence}) / (\text{cohérence aléatoire})$$
- Evaluation d'une cohérence globale d'appréciation

en résumé :

- 1) *Calcul automatique des poids des critères et sous-critères*
- 2) *Classement (sous forme de note) de sites en fonction des valeurs données pour chacun d'eux selon chaque critère et sous-critères*

Evaluation de zones géographiques

suivant leur vulnérabilité en cas d'inondation

4.3 Application à 4 sites le la zone d'étude

L'évaluation multicritère de la vulnérabilité en cas a fait l'objet d'une comparaison de cette vulnérabilités sur différentes zones d'inondation sur le site de la basse vallée du Var à Nice ainsi qu'à l'embouchure de la vallée du Paillon. L'évaluation a été également faite sur un site fictif pour illustrer le développement de la méthode (Annexe).

Site n°2 : embouchure de la vallée du Paillon

Ce scénario correspond à l'étude d'une zone qui se situe sur l'embouchure de la vallée du Paillon à Nice de part et d'autre de chaque rive jusqu'à un éloignement maximum de 500 mètres de la rivière. Cette parcelle est considérée " hors zone inondable" mais se situe en plein champs d'inondation du cours d'eau. La hauteur maximale des eaux dans le quartier a été estimée supérieure à 1 mètre dans le cas d'une inondation. Aucune caserne de pompiers étant au sein de cette parcelle, l'intervention des secours ne serait pas très rapide. Ces critères sont les mêmes pour tous types d'occupation des sols sur le secteur étudié. La zone étudiée se situe en centre ville dans un site à forte densité de population. La récolte des données a été essentiellement effectuée par l'intermédiaire de supports cartographiques issus de l'étude réalisée par l'IGA mais il fallut parfois extrapoler à partir de données partielles ou réduites (surtout pour le paramètre "secteur d'activité").

* Résumé des caractéristiques du site n°2 :

*éloignement maximum de 500 mètres de la rivière.
zone d'inondation du cours d'eau.
hauteur maximale des eaux > 1 mètre
site à forte densité de population
pas de caserne de pompiers*

occupation du sol :

- 15 établissements scolaires, 900 p. / établissement.
- pas d'entraînement d'évacuation d'urgence.
- 5 parcs et 2 squares
- 1 piscine, 2 bibliothèques, 1 casino, 1 patinoire, 2 grands palais d'exposition, 1 théâtre et 1 opéra
- aucun camping.
- circulation automobile forte en journée et modérée la nuit avec peu de possibilité d'échappatoire.
- circulation piétonne forte car la zone est très commerçante.
- aucune gare.
- aucune industrie à produits périssables, polluants ou toxiques.

- 2 grandes surfaces commerciales.
- nombreux commerces de proximité.
- aucune activité agricole
- parkings aériens et souterrains.
- 4 établissements hospitaliers sans patient au rez-de-chaussée.
- 2 commissariats, 14 bâtiments administratifs

Site n°3 : embouchure de la vallée du Var à Nice

Ce scénario correspond à l'étude d'une zone qui se situe sur l'embouchure de la vallée du Var à Nice de part et d'autre de chaque rive jusqu'à un éloignement maximum de 500 mètres de la rivière. Cette parcelle est considérée "hors zone inondable" mais se situe en plein champs d'inondation du cours d'eau.

Il s'agit du même type de configuration que le scénario précédent pour la vallée du Paillon. Les hauteurs d'eau retenues sont celles de l'inondation provoquée par la crue du Var en novembre 1994 qui fut l'une des plus importantes recensée. Lors de l'inondation représentative du 5/11/1994 la hauteur des eaux a atteint plus d'1 mètre dans ce secteur. Aucune caserne de pompiers n'étant localisée au sein de cette parcelle, l'intervention des secours serait relativement lente.

La zone concernée se situe en périphérie ouest de Nice dans un milieu à forte densité de population pour ce qui concerne la rive droite du Var et plutôt tourné vers le secteur tertiaire pour la rive gauche. Cependant la diversité de l'occupation du sol est importante puisque se mêlent activités agricoles, zones industrielles et commerciales, zones résidentielles, quelques grands ensembles, un grand centre administratif départemental, l'aéroport Nice Côte d'Azur, un axe de forte circulation (la route de Grenoble en 2X2 voies), l'autoroute A8 et une voie ferrée.

Le travail sur ce secteur a fait l'objet d'une étude poussée puisque les caractéristiques de cette zone ont été vérifiées sur le terrain même. La précision des données n'en est que plus élevée et la note finale que plus exacte.

* Résumé des caractéristiques du site n°3 :

- *éloignement maximum de 500 mètres de la rivière*
- *zone d'inondation du cours d'eau*
- *hauteur maximale des eaux > 1 mètre*
- *forte densité de population en rive droite du Var*
- *secteur tertiaire en rive gauche.*

occupation du sol (diversité importante) :

- 6 établissements scolaires (> 500 p. /établissement)
sans entraînement d'évacuation d'urgence.
- 8 parcs et 3 squares
- 1 piscine, 1 gymnase, terrains de sport, aucun camping
- circulation automobile forte en journée et modérée la nuit avec peu de possibilité d'échappatoire.
- circulation piétonne élevée car la rive droite est très commerçante.
- 2 gares et 1 aérogare, axe de forte circulation (A8 et voie ferrée)
- zones industrielles et commerciales et résidentielles
- Industries : (produits périssables non polluants et non toxiques, matériels au sol BTP) ,
1 très grande surface commerciale en RD (St-Laurent du Var),
1 importante hall aux fleurs, commerces de proximité
- activité agricole moyennement développée
- nombreux parkings non souterrains, réseaux électriques

- 1 commissariat et une gendarmerie, bâtiments administratifs aucun établissement hospitalier

Sites n°4 et 5 :

Ces deux scénarios correspondent à l'étude de 2 autres zones de la basse vallée du Var. Les surfaces étudiées sont bien moins importantes et sont considérées "hors zone inondable" mais elles se situent en plein champs d'inondation du cours d'eau. La hauteur maximale des eaux a été évaluée supérieure à 1 mètre comme pour le scénario n°3. L'intervention des secours serait aussi relativement lente. L'éloignement de la rivière est compris entre 500 et 1000 mètres pour le site n°5 avec un maximum de 500 mètres pour le site n°4.

*** Résumé des caractéristiques des sites n°4 et 5**

- *hauteur maximale > 1 mètre*
- *en zone d'inondation du cours d'eau*
- *intervention des secours serait relativement lente*
- *éloignement de la rivière : 500 m. site n°4, entre 500 et 1000 m. site n°5*

***POS Site n°4 :**

- aucun établissement scolaire,
- très nombreux terrains de sports, pas de camping
- circulation automobile élevée
- circulation piétonne de type commerçante
- 1 gare
- nombre élevé d'industries (produits périssables non polluants et non toxiques, coût produits/machines élevé)
- aucune grande surface peu de commerces de proximité
- activité agricole moyennement développée
- réseau électrique de l'aéroport, pas de parking souterrain
- aucun établissement hospitalier
- habitations pavillonnaires de densité moyenne
- nombreux bâtiments administratifs.

***POS Site n°5 :**

- 4 établissements scolaires + terrains de sport, pas de camping
- circulation automobile élevée
- circulation piétonne de type commerçante
- 1 gare
- aucune industrie (quantité quasiment nulle)
- aucune grande surface peu de commerces de proximité
- aucune activité agricole,
- réseau électrique de l'aéroport, pas de parking souterrain
- aucun établissement hospitalier
- type d'habitations mixte de densité faible et de type collectif de densité forte
- nombreux bâtiments administratifs

4.4.Résultats

4.4.1 Résultats du traitement par la MHM

Pour chacun des 5 sites étudiés une note correspondant au degré de vulnérabilité en cas d'inondation a été déterminée. Plus cette note est élevée, plus la vulnérabilité en cas d'inondation est forte. Pour les 5 scénarios retenus les notes obtenues suivant les poids préalablement établis des critères de l'arborescence sont les suivants :

<i>SITES</i>	Site n°1	Site n°2	Site n°3	Site n°4	Site n°5
<i>NOTES en %</i>	15.5	37	30.5	14	18

Note / degré de en cas d'inondation pour chacune des zones étudiées selon les poids retenus

Pour le calcul de ces notes, ce sont les critères « existence d'établissements scolaires, d'hôpitaux de cliniques et d'habitations » (critères de premier niveau) qui possèdent les poids les plus forts par rapport aux autres critères frères de premier niveau (existence de bâtiments administratifs et secteurs d'activité) .

4.4.2. Interprétation des résultats et analyse de sensibilité

La différence de notes obtenues montre la diversité en matière d'usage du sol entre chaque site. Le site n°2 correspond à la zone la plus vulnérable (37%) car cette parcelle, a non seulement la plus grande homogénéité en ce qui concerne l'occupation du sol, mais dispose aussi du plus grand nombre d'écoles et d'hôpitaux, critères pour lesquels les poids sont les plus élevés.

Le site n°3 de la basse vallée du Var à Nice est moins vulnérable que le site n°2 car il comporte moins de critères du premier niveau aux poids élevés (comme les hôpitaux ou les établissements scolaires). La vulnérabilité reste cependant élevée (30.5%) surtout si on la compare à celle du scénario n°1 (15.5%).

En ce qui concerne les sites n°4 (14%) et 5 (18%), les notes obtenues sont plus basses (bien plus faibles que celle attribuée au site n°3 dont ils sont issus). Leur surface d'étude est plus restreinte que les autres sites. La distribution des paramètres d'occupation du sol est beaucoup moins homogène et certains de ces paramètres ne sont plus présents. Ceci contribue à une diminution de la vulnérabilité. La différence de note pour ces deux sites est dû au fait que le site n°5 dispose d'un plus grand nombre d'habitations que le site n°4.

L'analyse de sensibilité des résultats à la modification des poids des critères de premier niveau (critères d'occupation du sol) a été effectuée:

		Notes obtenues en %			
SITE	Change- ments effectués sur les poids	Les critères "établissements scolaires, hôpitaux et habitations" sont plus importants que les critères « bâtiments administratifs et secteurs d'activité ».	Les critères "secteurs d'activité" et de "bâtiments administratifs" sont les plus importants que les critères « établissements scolaires, hôpitaux et habitations ».	Le critère « habitations » est plus important que tous les autres. Le poids du critère "secteur d'activité" est relativement faible.	Le poids du critère "secteur d'activité" est le plus élevé.
↓	→				
Scénario n°1		15.5	14.5	15	15.5
Site n°2		37	38	34	39
Site n°3		30.5	33	31.5	31
Site n°4		14	20	14	17
Site n°5		18	20	17	15

Notes obtenues selon les poids alloués aux critères d'usage du sol.

L'analyse de sensibilité effectuée montre que la vulnérabilité d'une zone évolue en fonction du poids accordé à chaque critère d'occupation du sol. Par exemple, la vallée du Var voit sa vulnérabilité augmenter (de 30.5 à 33%) si les critères « secteurs d'activité » et « bâtiments administratifs » sont prépondérants par rapport aux autres usages du sol.

4.5 Perspectives et développement de la méthode

Les facteurs d'inexactitudes de la méthode proposée sont d'une part liés aux données relatives aux modes d'occupations du sol d'un site étudié et, d'autre part à l'évaluation des critères. L'absence de connaissance et par conséquent le manque de précision sur les caractéristiques d'un site influence l'évaluation des critères.

La méthode possède aussi quelques désavantages. Elle ne permet pas la prise en compte de l'échelle "temporelle". Ainsi, la note calculée, exprime une vulnérabilité à un instant précis mais ne retient pas l'évolution au cours du temps. Néanmoins, il est possible de comparer la vulnérabilité d'un même site à deux dates différentes. Cependant, si l'on veut procéder à la comparaison de la vulnérabilité de plusieurs sites différents, il est important de choisir des zones de surface équivalente. Il est apparu lors de l'interprétation des résultats, que des sites de surfaces différentes recevaient des notes très distinctes les unes par rapport aux autres. Plus l'échelle d'analyse est grande, plus la vulnérabilité a tendance à être faible en raison d'une mauvaise distribution du mode d'occupation des sols. Un travail à une échelle plus petite, augmente la surface d'étude et par conséquent augmente l'homogénéité de l'usage du sol qui accroît la vulnérabilité en cas d'inondation.

Toutefois, il est important de signaler la grande modularité de la méthode de T. SAATY programmée sous DESCRIPTOR[®] qui permet de rajouter ou de supprimer des critères dans l'arborescence.

Le logiciel DESCRIPTOR[®] présente des inconvénients liés à sa conception. Il ne permet pas d'exprimer plus de 10 critères fils pour un même critère père. De ce fait, cette particularité oblige parfois à regrouper certains critères qui auraient mérité d'être séparés (exemple : le regroupement des critères « existence d'industries, de grandes surfaces, de commerces de proximité et d'activités agricoles en un seul paramètre : "secteurs d'activité".) afin que tous les usages du sol puissent être pondérés les uns par rapport aux autres sur le même niveau de l'arborescence.

Les pondérations entre critères frères sont facilement modifiables pour représenter les changements de préférence des décideurs.

Enfin, quelle est la valeur intrinsèque de la note calculée ? En quoi est-elle représentative d'un degré ou niveau de vulnérabilité ? La réponse à cette question est très délicate. En effet, comment savoir si une note de 30% correspond à une vulnérabilité faible ou relativement forte et quelle différence y a-t-il entre un site avec une vulnérabilité de 15% et un autre avec une vulnérabilité de 30% ? Pour résoudre ce problème, il serait nécessaire de disposer d'un référentiel en calculant avec précision la vulnérabilité d'une zone déjà touchée par une inondation en terme de dégâts estimés (humains, matériels et financiers) et pour laquelle toutes les caractéristiques de la catastrophe sont connues. La note obtenue pourrait alors servir de valeur étalon pour les autres notes. On pourrait même imaginer d'évaluer des vulnérabilités de cas réels mais dont les dommages aient été relativement distincts afin de disposer de repères divers. Ce type de travail mériterait, à ce niveau, une solide investigation.

La valeur des notes obtenues par analyse multicritère ne peuvent donc être exploitées qu'à titre de comparaison. Il s'agit d'une évaluation relative de la vulnérabilité de certaines zones soumises à des risques d'inondation par rapport à d'autres. Cette démarche pourrait être utilisée, par exemple, dans but d'identifier des zones prioritaires à aménager ou à protéger dans le cadre d'une planification urbaine concertée.

Enfin, si la MHM constitue un bon outil de structuration des critères considérés, un traitement par la méthode ELECTRE pour l'évaluation des sites à étudier serait nécessaire.

Développements de la méthode, principales pistes de travail complémentaire :

- *Choix des zones à traiter, critères non renseignés
Géoréférenciation des données,*
- *Validation
(historique de crues/inondations, événements futurs)*
- *Analyses de sensibilité : critères, poids, échelles de notation*
- *Sensibilité de la vulnérabilité aux changement d'échelle et à la résolution de l'information*
- *Distinction : critères Aléa - critères Vulnérabilité*
- *Traitement Electre*
- *Qualité de simulation hydraulique vs résolution des données en entrée de modèles*

ANNEXE : Exemple de traitement par la Méthode Hiérarchique Multicritère

Ex : le chiffre **4** si on préfère **4** fois le critère **Y** au critère **X**.

le chiffre **5** si on préfère **5** fois le critère **Z** au critère **X**.

le chiffre **3** si on préfère **3** fois le critère **Z** au critère **Y**.

CRITERES	X	Y	Z
X	1	0.25	0.2
Y	4	1	0.33
Z	5	3	1
Somme	10	4.25	1.53

Un élément situé sur la gauche est par convention examiné en fonction de sa dominance sur un élément situé au sommet de la matrice.

- 1) Cette matrice est normalisée afin de créer une nouvelle matrice dont la somme des colonnes est égale à 1

Pour l'exemple :

CRITERES	X	Y	Z	Somme des lignes
X	$1/10 = \mathbf{0.1}$	$0.25/4.25 = \mathbf{0.059}$	$0.2/1.53 = \mathbf{0.131}$	$0.1+0.059+0.131 = \mathbf{0.289}$
Y	$4/10 = \mathbf{0.4}$	$1/4.25 = \mathbf{0.235}$	$0.33/1.53 = \mathbf{0.216}$	$0.4+0.235+0.216 = \mathbf{0.851}$
Z	$5/10 = \mathbf{0.5}$	$3/4.25 = \mathbf{0.706}$	$1/1.53 = \mathbf{0.654}$	$0.5+0.706+0.654 = \mathbf{1.859}$

CRITERES	Poids des critères = (somme des lignes/nombres de critères)
X	$0.289/3 = \mathbf{0.096}$
Y	$0.851/3 = \mathbf{0.284}$
Z	$1.859/3 = \mathbf{0.619}$

- 2) Afin d'évaluer la **cohérence** de nos jugements, il faut calculer une valeur appelée "**ratio de cohérence**". Il faut éviter que notre décision soit fondée sur des appréciations si peu cohérentes qu'elles pourraient sembler aléatoires. Pour cela, la MHM évalue la cohérence globale d'appréciation au moyen de ce ratio de cohérence. Sa valeur doit être égale ou inférieure à 10%, sinon les appréciations risquent d'être quelque peu aléatoires et peuvent alors exiger certaines révisions.

→ Il faut alors multiplier les valeurs de la matrice de comparaison binaire (cf. 3)) avec la valeur des poids des critères calculée dans le paragraphe 4). Ainsi on peut obtenir la **matrice d'évaluation de la cohérence**.

CRITERES	X	Y	Z	Somme des lignes
X	$1 \times 0.096 = \mathbf{0.096}$	$0.25 \times 0.284 = \mathbf{0.71}$	$0.2 \times 0.619 = \mathbf{0.124}$	0.291
Y	$4 \times 0.096 = \mathbf{0.384}$	$1 \times 0.284 = \mathbf{0.284}$	$0.33 \times 0.619 = \mathbf{0.204}$	0.875
Z	$5 \times 0.096 = \mathbf{0.480}$	$3 \times 0.284 = \mathbf{0.852}$	$1 \times 0.619 = \mathbf{0.619}$	1.953

CRITERES	COHERENCE = Somme des lignes / poids des critères
X	$0.291 / 0.096 = \mathbf{3.02}$
Y	$0.875 / 0.284 = \mathbf{3.08}$
Z	$1.953 / 0.619 = \mathbf{3.15}$
Cohérence moyenne	$(3.02 + 3.08 + 3.15) / 3 = \mathbf{3.083}$

Indice de cohérence = (cohérence moyenne – nombre d'éléments) / (nombre d'éléments – 1)

donc pour l'exemple :

$$\text{Indice de cohérence} = (3.083 - 3) / (3 - 1) = \mathbf{0.042}$$

Ratio de cohérence = (indice de cohérence) / (cohérence aléatoire) donc pour l'exemple :

Ratio de cohérence = $(0.042) / (0.58) = \mathbf{0.07}$ qui correspond à **7%**, ce qui est satisfaisant puisque en dessous de 10%.

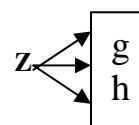
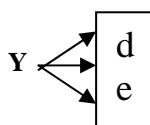
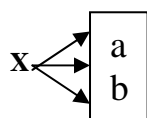
Il faut préciser que la cohérence aléatoire est définie pour une matrice donnée. Pour une matrice 3X3, sa valeur est de 0.58.

3) La même démarche doit être effectuée pour chaque critère de tous les niveaux :

- Poids des critères.
- Ratio de cohérence des critères.

(Voir matrices à la suite).

- Pour l'exemple :



Critère X	a	b	c	Poids des sous critères
a	1	2	3.33	0.551
b	0.5	1	2	0.293
c	0.3	0.5	1	0.156

- Après calculs : Cohérence moyenne = **3.00**
- Après calculs : Indice de cohérence = **0.0018** (satisfaisant).

Critère Y	d	e	f	Poids des sous critères
d	1	2.5	10	0.612
e	0.4	1	10	0.340
f	0.1	0.1	1	0.047

- Après calculs : Cohérence moyenne = **3.10**
- Après calculs : Indice de cohérence = **0.047** (satisfaisant).

Critère Z	g	h	i	Poids des sous critères
g	1	0.2	0.08	0.050
h	5	1	0.2	0.198
i	12	5	1	0.751

- Après calculs : Cohérence moyenne = **3.04**
- Après calculs : Indice de cohérence = **0.030** (satisfaisant).

- 4) Une fois l'étape 6) franchie, il faut alors effectuer le tableau des poids des sous-critères (a, b, c, d,...) pondéré par le poids des critères (X, Y, Z) et cela pour chaque niveau de la hiérarchie.

- Pour l'exemple :

	X
a	0.053 (Cf. exemple par la suite)
b	0.028
c	0.015

	Y
d	0.174
e	0.097
f	0.013

	Z
g	0.310
h	0.123
i	0.465

- Les valeurs des trois tableaux ci-dessus sont calculées en multipliant le poids du critère par le poids du sous-critère correspondant.

- Exemple : Pour trouver **0.53** dans le premier tableau, il a fallu multiplier le poids du critère X et celui du sous-critère a : $0.096 * 0.551 = 0.053$.

Il faut alors retenir les poids les plus élevés (**surlignés en gris**) pour chaque critère.

- On obtient alors les poids pondérés des couples préférés :

$a/X \Rightarrow 0.053$	}	<p>Les poids pondérés sont alors normalisés : $a/X : 0.053/0.692 = 0.077$</p> <p>$d/Y : 0.174/0.692 = 0.251$</p> <p>$i/Z : 0.465/0.692 = 0.672$</p>
$d/Y \Rightarrow 0.174$		
$i/Z \Rightarrow 0.465$		
Somme : <u>0.692</u>		

- 5) Imaginons que le problème soit la sélection du meilleur "produit" à partir de **3 choix** possibles **P1, P2, P3** en utilisant les 3 critères X, Y, Z.

Entre chaque produit, il faut élaborer **les matrices de comparaison binaire** des caractéristiques des produits étudiés. La référence sera la caractéristique la plus attractive.

- Pour l'exemple :

Pour a/X	P1	P2	P3
P1	1	2	3.33
P2	0.5	1	2
P3	0.3	0.5	1

On normalise (%) puis on effectue la somme des lignes qu'on divise par le nombre de produits. On obtient le poids des produits du couple préféré a/X :

	Poids des produits	}	<p><u>Cohérence moyenne : 3.00</u></p> <p>Indice de cohérence : 0.002 (satisfaisant).</p>
P1	0.551		
P2	0.293		
P3	0.156		

Pour d/Y	P1	P2	P3
P1	1	1.33	1.66
P2	0.75	1	1.33
P3	0.60	0.75	1

On normalise (%) puis on effectue la somme des lignes qu'on divise par le nombre de produits. On obtient le poids des produits du couple préféré d/Y :

	Poids des produits	<u>Cohérence moyenne : 3.00</u> Indice de cohérence : 0.002 (satisfaisant).
P1	0.424	
P2	0.326	
P3	0.249	

Pour i/Z	P1	P2	P3
P1	1	0.5	0.83
P2	2	1	0.50
P3	1.2	2	1

On normalise (%) puis on effectue la somme des lignes qu'on divise par le nombre de produits. On obtient le poids des produits du couple préféré i/Z :

	Poids des produits	<u>Cohérence moyenne : 3.16</u> Indice de cohérence : 0.081 (satisfaisant).
P1	0.551	
P2	0.293	
P3	0.156	

- 6) Le poids des produits ainsi calculé est alors pondéré par le poids normalisé des couples préférés calculé en 7). On obtient alors le tableau suivant :

	a/X	d/Y	i/Z	Somme des lignes
P1	$0.077 * 0.551 = \mathbf{0.042}$	$0.251 * 0.424 = \mathbf{0.107}$	$0.672 * 0.246 = \mathbf{0.165}$	0.31
P2	$0.077 * 0.293 = \mathbf{0.023}$	$0.251 * 0.326 = \mathbf{0.082}$	$0.672 * 0.325 = \mathbf{0.218}$	0.32
P3	$0.077 * 0.156 = \mathbf{0.012}$	$0.251 * 0.249 = \mathbf{0.062}$	$0.672 * 0.429 = \mathbf{0.288}$	0.36

7) **CONCLUSION :**

Le produit P3 est préféré au produit P2 qui est lui même préféré au produit P1.

La MHM propose ainsi une démarche claire et simple à la compréhension. Elle se propose de classer différents produits, projets, scénarios, etc., selon les notes obtenues. Cette méthode va donc nous permettre d'évaluer des zones géographiques suivant leur vulnérabilité aux inondations. De plus, le logiciel DESCRIPTOR® va faciliter l'exécution de cet outil d'aide à la décision.

8) *exemple général :*

Ex : le chiffre 4 si on préfère 4 fois le critère Y au critère X.

le chiffre 5 si on préfère 5 fois le critère Z au critère X.

le chiffre 3 si on préfère 3 fois le critère Z au critère Y.

CRITERES	X	Y	Z
X	1	0.25	0.2
Y	4	1	0.33
Z	5	3	1
Somme	10	4.25	1.53

Un élément situé sur la gauche est par convention examiné en fonction de sa dominance sur un élément situé au sommet de la matrice.

- 9) Cette matrice est normalisée afin de créer une nouvelle matrice dont la somme des colonnes est égale à 1

Pour l'exemple :

CRITERES	X	Y	Z	Somme des lignes
X	$1/10 = \mathbf{0.1}$	$0.25/4.25 = \mathbf{0.059}$	$0.2/1.53 = \mathbf{0.131}$	$0.1+0.059+0.131 = \mathbf{0.289}$
Y	$4/10 = \mathbf{0.4}$	$1/4.25 = \mathbf{0.235}$	$0.33/1.53 = \mathbf{0.216}$	$0.4+0.235+0.216 = \mathbf{0.851}$
Z	$5/10 = \mathbf{0.5}$	$3/4.25 = \mathbf{0.706}$	$1/1.53 = \mathbf{0.654}$	$0.5+0.706+0.654 = \mathbf{1.859}$

CRITERES	Poids des critères = (somme des lignes/nombres de critères)
X	$0.289/3 = \mathbf{0.096}$
Y	$0.851/3 = \mathbf{0.284}$
Z	$1.859/3 = \mathbf{0.619}$

- 10) Afin d'évaluer la **cohérence** de nos jugements, il faut calculer une valeur appelée "**ratio de cohérence**". Il faut éviter que notre décision soit fondée sur des appréciations si peu cohérentes qu'elles pourraient sembler aléatoires. Pour cela, la MHM évalue la cohérence globale d'appréciation au moyen de ce ratio de cohérence. Sa valeur doit être égale ou inférieure à 10%, sinon les appréciations risquent d'être quelque peu aléatoires et peuvent alors exiger certaines révisions.

→ Il faut alors multiplier les valeurs de la matrice de comparaison binaire (cf. 3)) avec la valeur des poids des critères calculée dans le paragraphe 4). Ainsi on peut obtenir la **matrice d'évaluation de la cohérence**.

CRITERES	X	Y	Z	Somme des lignes
X	$1*0.096 = \mathbf{0.096}$	$0.25*0.284 = \mathbf{0.71}$	$0.2*0.619 = \mathbf{0.124}$	$\mathbf{0.291}$
Y	$4*0.096 = \mathbf{0.384}$	$1*0.284 = \mathbf{0.284}$	$0.33*0.619 = \mathbf{0.204}$	$\mathbf{0.875}$
Z	$5*0.096 = \mathbf{0.480}$	$3*0.284 = \mathbf{0.852}$	$1*0.619 = \mathbf{0.619}$	$\mathbf{1.953}$

CRITERES	COHERENCE = Somme des lignes / poids des critères
X	$0.291 / 0.096 = \mathbf{3.02}$
Y	$0.875 / 0.284 = \mathbf{3.08}$
Z	$1953 / 0.619 = \mathbf{3.15}$
Cohérence moyenne	$(3.02 + 3.08 + 3.15) / 3 = \mathbf{3.083}$

Indice de cohérence = (cohérence moyenne – nombre d'éléments) / (nombre d'éléments – 1)

donc pour l'exemple :

Indice de cohérence = $(3.083 - 3) / (3 - 1) = \mathbf{0.042}$

Ratio de cohérence = (indice de cohérence) / (cohérence aléatoire) donc pour l'exemple :

Ratio de cohérence = $(0.042) / (0.58) = \mathbf{0.07}$ qui correspond à **7%**, ce qui est satisfaisant puisque en dessous de 10%.

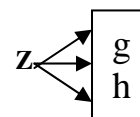
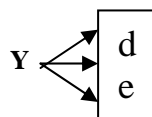
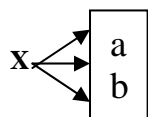
Il faut préciser que la cohérence aléatoire est définie pour une matrice donnée. Pour une matrice 3X3, sa valeur est de 0.58.

11) La même démarche doit être effectuée pour chaque critère de tous les niveaux :

- Poids des critères.
- Ratio de cohérence des critères.

(Voir matrices à la suite).

- Pour l'exemple :



Critère X	a	b	c	Poids des sous critères
a	1	2	3.33	0.551
b	0.5	1	2	0.293
c	0.3	0.5	1	0.156

- Après calculs : Cohérence moyenne = **3.00**
- Après calculs : Indice de cohérence = **0.0018** (satisfaisant).

Critère Y	d	e	f	Poids des sous critères
d	1	2.5	10	0.612
e	0.4	1	10	0.340
f	0.1	0.1	1	0.047

- Après calculs : Cohérence moyenne = **3.10**
- Après calculs : Indice de cohérence = **0.047** (satisfaisant).

Critère Z	g	h	I	Poids des sous critères
g	1	0.2	0.08	0.050
h	5	1	0.2	0.198
i	12	5	1	0.751

- Après calculs : Cohérence moyenne = **3.04**
- Après calculs : Indice de cohérence = **0.030** (satisfaisant).

12) Une fois l'étape 6) franchie, il faut alors effectuer le tableau des poids des sous-critères (a, b, c, d,...) pondéré par le poids des critères (X, Y, Z) et cela pour chaque niveau de la hiérarchie.

- Pour l'exemple :

	X
a	0.053 (Cf. exemple par la suite)
b	0.028
c	0.015

	Y
d	0.174
e	0.097
f	0.013

	Z
g	0.310
h	0.123
i	0.465

- Les valeurs des trois tableaux ci-dessus sont calculées en multipliant le poids du critère par le poids du sous-critère correspondant.

- Exemple : Pour trouver **0.53** dans le premier tableau, il a fallu multiplier le poids du critère X et celui du sous-critère a : $0.096 * 0.551 = 0.053$.

Il faut alors retenir les poids les plus élevés (**surlignés en gris**) pour chaque critère.

- On obtient alors les poids pondérés des couples préférés :

$a/X \Rightarrow 0.053$	}	<p>Les poids pondérés sont alors normalisés : $a/X : 0.053/0.692 = 0.077$</p> <p>$d/Y : 0.174/0.692 = 0.251$</p> <p>$i/Z : 0.465/0.692 = 0.672$</p>
$d/Y \Rightarrow 0.174$		
$i/Z \Rightarrow 0.465$		
Somme : <u>0.692</u>		

- 13) Imaginons que le problème soit la sélection du meilleur "produit" à partir de **3 choix** possibles **P1, P2, P3** en utilisant les 3 critères X, Y, Z.

Entre chaque produit, il faut élaborer **les matrices de comparaison binaire** des caractéristiques des produits étudiés. La référence sera la caractéristique la plus attractive.

- Pour l'exemple :

Pour a/X	P1	P2	P3
P1	1	2	3.33
P2	0.5	1	2
P3	0.3	0.5	1

On normalise (%) puis on effectue la somme des lignes qu'on divise par le nombre de produits. On obtient le poids des produits du couple préféré a/X :

	Poids des produits	}	<p><u>Cohérence moyenne : 3.00</u></p> <p>Indice de cohérence : 0.002 (satisfaisant).</p>
P1	0.551		
P2	0.293		
P3	0.156		

Pour d/Y	P1	P2	P3
P1	1	1.33	1.66
P2	0.75	1	1.33
P3	0.60	0.75	1

On normalise (%) puis on effectue la somme des lignes qu'on divise par le nombre de produits. On obtient le poids des produits du couple préféré d/Y :

	Poids des produits
P1	0.424
P2	0.326
P3	0.249

}

Cohérence moyenne : 3.00

Indice de cohérence : 0.002
(satisfaisant).

Pour i/Z	P1	P2	P3
P1	1	0.5	0.83
P2	2	1	0.50
P3	1.2	2	1

On normalise (%) puis on effectue la somme des lignes qu'on divise par le nombre de produits. On obtient le poids des produits du couple préféré i/Z :

	Poids des produits
P1	0.551
P2	0.293
P3	0.156

}

Cohérence moyenne : 3.16

Indice de cohérence : 0.081
(satisfaisant).

14) Le poids des produits ainsi calculé est alors pondéré par le poids normalisé des couples préférés calculé en 7). On obtient alors le tableau suivant :

	a/X	d/Y	i/Z	Somme des lignes
P1	$0.077 * 0.551 = \mathbf{0.042}$	$0.251 * 0.424 = \mathbf{0.107}$	$0.672 * 0.246 = \mathbf{0.165}$	0.31
P2	$0.077 * 0.293 = \mathbf{0.023}$	$0.251 * 0.326 = \mathbf{0.082}$	$0.672 * 0.325 = \mathbf{0.218}$	0.32
P3	$0.077 * 0.156 = \mathbf{0.012}$	$0.251 * 0.249 = \mathbf{0.062}$	$0.672 * 0.429 = \mathbf{0.288}$	0.36

15) **CONCLUSION :**

Le produit P3 est préféré au produit P2 qui est lui même préféré au produit P1.